



TU Clausthal

Entwicklung von Verfahren und Bohrtechniken zur zufälligen Volumenelemententnahme aus Ballen

D i s s e r t a t i o n
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Christian Borowski, M.Eng.
aus Bad-Wildungen

genehmigt von der
Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der
Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

12.03.2018

Dekan:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Bernd Lehmann

Vorsitzender der Promotionskommission:

Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer

Hauptberichterstatte:

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Mitberichterstatte:

Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel

Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Poerschke

Danksagung

Während meiner Promotion hatte ich eine Vielzahl an Förderern, die meine Arbeit mit ihrem Fachwissen und ihrer Hilfsbereitschaft bereichert haben.

Mein Dank geht an Herrn Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann, der stets konstruktiv auftretende Problemstellungen mit mir diskutiert und zu deren Lösung beitragen konnte. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel, der meine Dissertation von Seiten des Maschinenbaus begleitet hat. Des Weiteren richtet sich mein Dank an Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Poerschke wie auch an Frau Prof. Dr.-Ing. Dannewitz. Beide haben mich seit den ersten Arbeiten als studentische Hilfskraft an der Hochschule Nordhausen gefördert und meine Absicht zur Aufnahme einer wissenschaftlichen Laufbahn gestärkt. Gerade durch Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Poerschke konnte ich mein Wissen in der Probenahmetheorie erweitern und für diese Arbeit anwendungsorientiert einsetzen.

Mit der Hilfe von Partnern aus Industrie und Wirtschaft habe ich Grundlagen für meine Promotion erlangen können, ihnen gilt mein ausdrücklicher Dank. Darüber hinaus ist eine solche Promotion nicht ohne Team zu realisieren. Ich danke meinem Forschungsteam Umwelt- und Recyclingtechnik für die vielen Stunden in Werkstatt, Feld sowie Labor und bin gespannt auf die nächsten gemeinsamen Projekte.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Lebensgefährtin Nicole, die dieses ingenieurtechnische Thema aus geisteswissenschaftlicher Sicht begleitet und mit Hilfe ihrer analytischen Denkweise unterstützt hat.

Kurzfassung

Für den Umgang mit Abfällen ist das Wissen über die Zusammensetzung wichtig. Erkenntnisse darüber werden u. a. mit Hilfe von zeitaufwendigen, händischen Probenahmen aus gepressten Abfällen gewonnen. In der vorliegenden Dissertation werden Verfahren und Bohrtechniken zur zufälligen Volumenelemententnahme aus Ballen entwickelt. Neben der stofflichen Charakterisierung von Ballen aus dem Bereich der Leichtverpackungen sollen Verfahren zur Entnahme von Proben über zufällig ausgewählte x-, y- und z-Koordinaten diskutiert werden. Zur Probenentnahme sind geeignete Bohrer und Steuerungstechniken zu konzipieren. Des Weiteren dient die Dissertation als Grundlage für das Normverfahren Ballenbeprobung.

Um die technischen Eigenschaften von Ballen aus Sortierfraktionen zu ermitteln, wurden acht Sortier- und Recyclingbetriebe besucht. Von den zurzeit 31 Ballenarten, mit unterschiedlichen Inhaltsstoffen, wurden die Abmessungen und jeweiligen Durchschnittsgewichte für die zurückliegenden sechs Monate aufgenommen. Anhand dieser grundlegenden Daten sind die Dichten der Ballen und die Verdichtungsgrade der Ballenpressen berechnet worden. Diese Datenberechnung ist nötig, damit die aus dem Ballen zu entnehmende Menge im Vorfeld der Probenahme bestimmbar ist. Als Basis der zufallsgenerierten Bohrpunktermittlung wurden die Bindedrähte, mit denen die Inhaltsstoffe im Ballen fixiert sind, sowie die Randbereiche des Ballens untersucht. Ebenso sind Schlangen-, Forstner- und Bohrkernbohrer an Ballen der Produktspezifikationen Kunststoff-Folien sowie Misch-PET 70/30 getestet worden. Fokus lag hierbei auf der Schneidleistung, der damit verbundenen Erwärmung, den Auswirkungen auf das Bohrgut und der Störanfälligkeit. Ausgewählte Richtlinien/Normen wurden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die Ballenbeprobung betrachtet.

Ballen weisen durchschnittlich Abmaße von 1085 x 1026 x 1167 mm bei einem Gewicht von 531 kg und einer entsprechenden Dichte von 409 kg/m³ auf. Sie werden mit Kanallballenpressen hergestellt, die das Ausgangsmaterial im Durchschnitt um das Siebenfache verdichten. Da bisher verwendete Richtlinien/Normen überwiegend für Probenahmen aus Haufwerken gelten, ist das Verfahren der „Ballenbeprobung zufallsgeneriert“ entwickelt worden. Mit diesem kann auf Basis der Dimensionen, des nutzbaren Volumens und der Bohrtechnik eine zufallsorientierte Probenahme aus Ballen stattfinden. Das Verfahren wurde auf die LAGA PN 98, die integrale Charakterisierung und die Probenahme nach Grünem Punkt beispielhaft übertragen, um die Beprobung von Ballen unter Anwendung etablierter Vorschriften zu ermöglichen. Für die Probenahme ist der Zackenbohrer konstruiert worden, welcher bis zu 600 mm lange Volumenelemente mit Hilfe von 90° zum Umfang gesetzten Wendeschneidplatten herausbohrt. Die maximale Erwärmung eines Volumenelements ist im Vergleich zu einer konventionellen Betonbohrkrone mit 40 °C halb so groß. Nach dem Verfahren der „Ballenbeprobung zufallsgeneriert“ sind bei einem Bohrerdurchmesser von 60 mm und einer Volumenelementlänge von 100 mm für eine zehn Liter umfassende Probe fünf Volumenelemente zufallsbasiert herauszubohren. Für den Zufallsgenerator und eine zu automatisierende Ballenbeprobungsmaschine wurden Programmablaufpläne erstellt. Erstmals sind Ballen mit ihren physischen Eigenschaften katalogisiert. Insgesamt wurden vier Probenahmeverfahren, ein Bohrertyp und ein schematischer Ablauf der Steuerung entwickelt. Dabei liegen die Entnahmezeiten für die Erzeugung einer Laborprobe, bei Anwendung auf die Produktspezifikation „350 – Mischkunststoff“, zwischen 1,5 und 24 Minuten.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	X
Symbol- und Einheitenverzeichnis	XII
1 Einleitung.....	1
2 Zielstellung der neuen Verfahrensentwicklung und Ist-Stand der Ballen-Qualitätssicherung	3
2.1 Zielstellung der neuen Verfahrensentwicklung.....	4
2.1.1 Ziel 1 - Stoffliche Charakterisierung von Ballen	5
2.1.2 Ziel 2 - Erhöhung der Proben-Aussagekraft anhand einer zufallsgenerierten Volumenelemententnahme.....	5
2.1.3 Ziel 3 - Auslegung von Bohr- und Steuerungstechniken	6
3 Ausgangssituation und Praxisbeispiele sowie Darstellung von Defiziten	7
3.1 Probenahme nach den Richtlinien des Grünen Punktes	8
3.2 Sortieranalyse der GBP Quality GmbH.....	11
3.3 Nationales Kunststoff-Recyclingkonsortium COREPLA (Italien)	12
3.4 Probenahme in einer Sekundärrohstoff-Aufbereitung	12
3.5 Beprobung von Ballen an der Montanuniversität Leoben.....	13
3.6 Vorgehen bei der Papier-Pappe-Kartonage-Beprobung	15
3.7 Beprobung von Biomasse-Ballen.....	15
4 Ballencharakteristik und ausgewählte Probenahmemethoden für Sekundärrohstoffe	17
4.1 Charakterisierung und Klassierung von Ballen	17
4.1.1 Verdichtungsverfahren in Ballenpressen	19
4.1.2 Parameter und Effizienz von Ballenpressen	20
4.1.3 Anzutreffende Ballendimensionen in den Dualen Systemen.....	21
4.2 Ausgewählte Probenahmemethoden als Grundlage für eine mögliche Verfahrensübertragung.....	22
4.2.1 Bohrkern-Probenahmetheorie nach Pierre Gy und Francis P. Pitard.....	24
4.2.2 Anwendung der Richtlinie LAGA PN 98.....	26
4.2.3 Vorgehen nach Beiblatt 08/2014 des Grünen Punktes - Sortieranalyse	26
4.2.4 Annahmestichprobenverfahren anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten - DIN ISO 18414:2012-02	27
4.2.5 Anleitung für die Entnahme von Proben zur integralen Charakterisierung von Haufwerken – DIN 19698-2:2016-12.....	28

4.2.6	Entstehung der Pressbohrmethode und resultierende Norm DIN 54385:2016-08	29
5	Verfahrensentwicklung Ballenbeprobung mit zufallsgenerierten Entnahmekoordinaten.....	30
5.1	Zufallsgenerierte Koordinaten im Ballen	31
5.2	Verfahren zur repräsentativen Ballenauswahl für eine vorgegebene Grundmenge	33
5.2.1	Zufällige Ballenauswahl in einem LKW, Container oder Schiff.....	33
5.2.2	Zufällige Ballenauswahl in einem Lager	34
5.3	Verfahren zur Vorbereitung der Probenahme aus Ballen.....	35
5.3.1	Festlegung der Rand- und Sicherheitsbereiche.....	36
5.3.2	System zur Generierung der Bohrpunkte	37
5.3.3	Möglichkeiten des Erfassens/Abtragens von Entnahmekoordinaten	41
5.4	Entnahmestrategie	42
5.4.1	Volumenbasierte Entnahmestrategie.....	43
5.4.2	Massenbasierte Entnahmestrategie	43
5.4.3	Programmablauf zur Erstellung eines zufallsgenerierten Probenentnahmeplans	44
5.5	Ballenbeprobung auf Basis zufallsgenerierter Entnahmekoordinaten – Verfahren Ballenbeprobung ZG	45
5.6	Übertragung des Verfahrens Ballenbeprobung ZG auf ausgewählte Richtlinien und Normen	46
5.6.1	Übertragung Ballenbeprobung ZG auf LAGA PN 98 – Verfahren BP-PN 98 ZG	47
5.6.2	Übertragung Ballenbeprobung ZG auf DIN 19698-2:2016-12 Integrale Charakterisierung – Verfahren BP-Integral ZG	48
5.6.3	Übertragung Ballenbeprobung ZG auf die Sortierrichtlinie des Grünen Punktes – Verfahren BP-Sortier ZG.....	50
5.6.4	Vergleich der diskutierten Verfahren	51
6	Entwicklung der Bohrtechniken zur Beprobung von Ballen	52
6.1	Getestete und angepasste Bohrwerkzeuge	53
6.1.1	Schlangen- und Forstnerbohrer.....	54
6.1.2	Fliesenbohrkrone	55
6.1.3	Betonbohrkrone.....	56
6.1.4	Zackenbohrerkonstruktion auf Grundlage der Versuche.....	57
6.1.5	Test der neuen Konstruktion - Zackenbohrkrone.....	59
6.2	Umgang mit Verschmelzungserscheinungen.....	60
6.2.1	Analyse Verschmelzung Betonbohrkrone.....	61
6.2.2	Analyse Verschmelzung Fliesenbohrkrone.....	62
6.2.3	Analyse Verschmelzung Zackenbohrkrone	62
6.2.4	Einfluss auf das Sortier-/Analyseergebnis und Handlungsalternativen	63
6.3	Bohrerkonzipierung und entstehende Zeitvorteile	65
6.3.1	Auswahl der Bohrer auf Basis von DSD-Produktspezifikationen.....	66

6.3.2	Auswertungsmöglichkeiten	67
6.4	Versuche zur Ballenbeprobung mit dem Grünen Punkt	68
6.5	Steuer- und Erkennungstechnik als Bestandteil der repräsentativen Probenahme.....	71
6.5.1	Konzeption Simulationsstand auf Basis einer SPS	71
6.5.2	Optische Erkennungsmöglichkeiten für Ränder und Bindungen	72
6.5.3	Ablauf der automatisierten Probenahme und Visualisierung.....	74
7	Fazit mit Ausblick.....	77
Anhang A: Daten Ballendimensionen		80
Anhang B: Ablauf Sortieranalyse GBP Quality GmbH.....		81
Anhang C: Probenahmeprotokoll COREPLA Italien		83
Anhang D: Ausgewählte Kanalballenpressen		84
Anhang E: Ballenlexikon (eigene Fotoaufnahmen)		85
Anhang F: Berechnungen Ballenbeprobung ZG		93
Anhang G: Berechnungen BP-PN 98 ZG		95
Anhang H: Berechnungen BP-Integral ZG.....		97
Anhang I: Berechnungen BP-Sortier ZG		99
Anhang J: Skizze Zackenbohrer \varnothing 60 mm		103
Anhang K: Skizze Zackenbohrer \varnothing 100 mm		104
Anhang L: Zackenbohrkrone wartungsfähig.....		105
Anhang M: Bohrgruppen und Störstoffanteil der DSD-Fractionen.....		106
Anhang N: Daten Bohrversuche Bohrkronentemperatur PET-Ballen		107
Anhang O: Folienballen-Bohrkernanalyse I		109
Anhang P: Folienballen-Bohrkernanalyse II.....		110
Anhang Q: PET-Ballen Bohrkernanalyse.....		111
Anhang R: Programm für automatisierte Beprobung.....		116
Anhang S: Visualisierung der automatisierten Beprobung.....		124
Anhang T: Bildersammlung Ballenbeprobung.....		125
Anhang U: Versuchsprogramm Ballenbeprobung – Grüner Punkt und HSN		129
Anhang V: Daten DVD		137
Quellenverzeichnis.....		139

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: PET-Hohlkörper und Schaumstoffabfall in Form von Ballen.	3
Abb. 2: Einflussgrößen auf die Verfahrensentwicklung.	4
Abb. 3: Mischkunststoffanlieferungen und Entwicklung Kunststoffaufkommen.	7
Abb. 4: Arbeitsbereich für die Probenahme aus einem Ballen.	8
Abb. 5: Gemeinsamer Bohrertest HS Nordhausen und MU Leoben in Graz.	14
Abb. 6: Kernbohrmaschine für Papierballen mit Probenahmeschema.	15
Abb. 7: Beprobung eines Heuballens in der Schweiz.	16
Abb. 8: Schema LVP-Sortierung Stand der Technik 2012.	18
Abb. 9: Schaubild horizontale Ballenpresse.	19
Abb. 10: Presskraft im Verhältnis zum Verdichtungsgrad von Kanallballenpressen.	21
Abb. 11: Unterschiedliche Bindungsarten in Pressrichtung.	22
Abb. 12: Bohrer und Stechlanzen, die Begrenzungsfehler produzieren.	24
Abb. 13: Entwurf für eine Diamant-Kernbohrkrone.	25
Abb. 14: Grundschemata der Pressbohrmethode.	29
Abb. 15: Volumenelemente und Koordinaten im Ballen.	31
Abb. 16: Register für zufällige Ballenauswahl in einem LKW.	33
Abb. 17: Register für zufällige Ballenauswahl im Ballenlager A.	34
Abb. 18: Extreme Darstellung der Rand- und Sicherheitsbereiche eines Ballens.	36
Abb. 19: Auf Randbereich angepasstes Koordinatenkreuz.	37
Abb. 20: Ballen mit gesetzten Bindungs- und Randmarkern.	38
Abb. 21: Prüfung eines Bohrpunktes auf Lage zur Bindung.	38
Abb. 22: Lage von Bohrpunkten zueinander.	40
Abb. 23: Möglichkeit des manuellen Ablesens der Entnahmekoordinaten.	41
Abb. 24: Entnahmestrategien aus einem Ballen - Schnittdarstellung.	42
Abb. 25: Ablaufplan für einen zufallsgenerierten Probenentnahmeplan.	44
Abb. 26: Anzahl Volumenelemente für Verfahren Ballenbeprobung ZG.	45
Abb. 27: Arbeitsplatz zur Sortierung von Bohrkernproben.	46
Abb. 28: Anzahl Volumenelemente und Ballen Verfahren BP-PN 98 ZG.	47
Abb. 29: Anzahl Volumenelemente Verfahren BP-Integral ZG.	49
Abb. 30: Anzahl Volumenelemente und Ballen Verfahren BP-Integral ZG.	49
Abb. 31: Anzahl Volumenelemente Verfahren BP-Sortier ZG.	50
Abb. 32: Entwicklungsstufen der Beprobungsmaschine für Ballen.	52
Abb. 33: Schlangen- und Forstnerbohrer.	54
Abb. 34: Selbstbau Fliesenbohrkrone mit Detailaufnahmen.	55
Abb. 35: Selbstbau Betonbohrkrone.	56
Abb. 36: Eingesetzte Zackenbohrer.	57
Abb. 37: Skizze Zackenbohrkrone mit acht dreieckförmigen Schneidplatten.	58
Abb. 38: Selbstbau Zackenbohrkrone.	59
Abb. 39: Temperaturmessung an der Betonbohrkrone.	60
Abb. 40: Verschmelzung und Temperaturmessung an Betonbohrkrone.	61
Abb. 41: Temperaturmessung an Fliesenbohrkrone.	62
Abb. 42: Beprobter Ballen und Temperaturmessung an Zackenbohrkrone.	63

Abb. 43: Vergleich der Bohrer über Sortieranalyse.....	63
Abb. 44: Sortieranalyse Produktspezifikation 310 und Auswahl Störstoffe.....	64
Abb. 45: Dauer Bohrvorgang Zackenbohrer.	65
Abb. 46: Versuch zur Ballenbeprobung mit dem Grünen Punkt.	69
Abb. 47: Prinzip des aufgebauten Simulationsstandes.	71
Abb. 48: Simulationsstand mit Raspberry Pi und Modellballen mit Markern.....	72
Abb. 49: Optische Erkennungsarten im Raspberry Pi.	73
Abb. 50: Muster- und Kreiserkennung der Ballenbindungen.	73
Abb. 51: Konzept automatisierter Ballenbeprober mit drehbarer Ballenauflage.	74
Abb. 52: Verwendete Bohrkernbohrer.....	129
Abb. 53: Versuchsschema Ballen I.	130
Abb. 54: Auswertung Ballen I / Seite 1 / 18 Proben à 100 mm.....	130
Abb. 55: Auswertung Ballen I / Seite 1 / 3 Proben à 600 mm.....	131
Abb. 56: Versuchsschema Ballen II.	132
Abb. 57: Auswertung Ballen II / Seite 1 / 15 Proben à 100 mm.....	132
Abb. 58: Auswertung Ballen II / Seite 1 / 3 Proben à 400 mm.....	133
Abb. 59: Gesamtauswertung Ballen I und II inkl. Stichproben.....	134

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ergebnisse einer Probenahme - Produktspezifikation 325 PET-Flaschen.....	10
Tab. 2: Vergleich der entwickelten Verfahren.....	51
Tab. 3: Temperaturen an ausgewählten Bohrerarten – Kunststofffolien 310.....	61
Tab. 4: Bohrer für Bohrgruppen auf Basis von Produktspezifikationen.....	66
Tab. 5: Versuchsplan gemeinsamer Versuch mit dem Grünen Punkt.....	68
Tab. 6: Daten Ballen I / Seite 1 / 18 Proben à 100 mm.	135
Tab. 7: Daten Ballen I / Seite 1 / 3 Proben à 600 mm.	135
Tab. 8: Daten Ballen II / Seite 1 / 15 Proben à 100 mm.	136
Tab. 9: Daten Ballen II / Seite 1 / 3 Proben à 400 mm.	136
Tab. 10: Daten Gesamtauswertung Ballen I und II inkl. Stichproben.....	136

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
A4	Papierformat; 21 cm x 29,7 cm
AA	Arbeits-Ausschuss (Deutsches Institut für Normung)
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e. V.
BalSam	Ball Sampling, Projekt, Montanuniversität Leoben
BOA	BOA Group, Firma (Deutschland)
BP	Ballenbeprober; Ballenbeprobung
BVSE	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung
CEN	Comité Européen de Normalisation, Europäisches Komitee für Normung
CONAI	Consorzio Nazionale Imballaggi (Italien), Nationales Verpackungskonsortium
COREPLA	National Consortium for the collection, recycling and recovery of plastic packaging (Italien)
CPU	Central-Processing-Unit; Prozessor
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKR	Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH, Firma
DSD	Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH, Firma
EBS	Ersatzbrennstoff
EDIN	Norm in Entwurfsfassung
EPS	Expandiertes Polystyrol
FE	Eisen
HMI	Human-Machine-Interface; Mensch-Maschine-Ein/-Ausgabebereich
HSN	Hochschule Nordhausen
IfP	Institution for Paper Science and Technology, Firma, Gesellschaft mit beschränkter Haftung
ISO	International Organization for Standardization
KEG	Misch-Polyolefine Beiprodukt
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LD-PE	Low Density Polyethylen
LVP	Leichtverpackungen
MAC	Macpresse, Firma (Italien)
MPO	Misch-Polyolefine
NA	Normausschuss
NIR	Nahinfrarot

PBM	Pressbohrmethode
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PLC	Programmable Logic Controller, speicherprogrammierbare Steuerung
PMV	Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik, Institut, Technische Universität Darmstadt
PN 98 (LAGA)	Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen
PO	Polyolefine
PP	Polypropylen
PPK	Papier-Pappe-Kartonage
PS	Polystyrol
spez.	spezifikationsgerecht
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
VE	Volumenelement
ZG	Zufallsgeneriert

Symbol- und Einheitenverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
a_{MD}	Maximaler Durchschlupf	-
a, b, c	Katheten für Berechnung Abstand Bohrpunkt-Bindung	mm
a_B, b_B, c_B	Katheten für Berechnung Bohrpunkt-Bohrpunkt	mm
B	Breite	mm; cm; m
d, \varnothing	Durchmesser	mm
f	Vorschub je Umdrehung	mm
$f(x)$	Funktion Bindung	-
f_z	Vorschub je (Schneidplatten)-Zahn	mm
GM	Grundmenge	m ³
$H_{0Ballen}$	Heterogenitätsfaktor	-
H_{Ballen}	Heterogenitätsverhältnis	-
H	Höhe	mm; cm; m
i	Anzahl der Schnitte	Stk.
K	Angesammeltes Vertrauen	-
$k_{Verdichtung}$	Verdichtungsgrad (des Ballens hier $\varnothing 7$)	-
$k(x)$	Funktion Bohrpunkt	-
l	Länge, Länge des Volumenelements	mm, cm, m
L	Vorschubweg	mm
m_1	Anzahl Mischproben (unverdichtet)	Stk.
m, m_i	Steigung	-
m_{Ballen}	Masse des Ballens	kg
m_{LP}	Mindestanzahl Laborproben	Stk.
m_{Probe}	Probenmenge	kg
n_0	Mindestanzahl Einzelproben (unverdichtet)	Stk.
n_1	Anzahl Einzelproben (unverdichtet)	Stk.
$n_{BallenGrundmenge}$	Losumfang, Anzahl Ballen einer Lieferung	Stk.
$n_{BallenBP-IntegralZG}$	Anzahl zu beprobender Ballen nach (DIN ISO 18414:2012-02)	Stk.
n_{Ballen}	Anzahl Ballen (auf LKW oder im Ballenlager)	Stk.
$n_{BP-IntegralZG}$	Anzahl Volumenelemente pro Ballen BP-Integral ZG	
$n_{BallenBP-PN98ZG}$	Anzahl zu beprobende Ballen	Stk.
$n_{BP-PN98ZG}$	Anzahl Volumenelemente pro Ballen BP-PN 98	Stk.
$n_{BP-SortierZG}$	Anzahl Volumenelemente pro Ballen BP-Sortier ZG	Stk.
n_{BP-ZG}	Anzahl Volumenelemente pro Ballen BP-ZG	Stk.
n, n_i	Schnittpunkt bei $x=0$ einer Geraden mit der y-Achse	mm
$n_{Drehzahl}$	Drehzahl Bohrer	1/min
n_P	Probenumfang	Stk.
n_{VE0}	Anzahl Einzelproben à 4,5 Liter	Stk.
n_{VE}	Anzahl Volumenelemente (verdichtet)	Stk.
N	Losumfang	-

ρ_{Ballen}	Ballendichte	Kg/m ³
r_B	Bohrerradius	mm
s_{Bindung}	Sicherheitsbereich um Bindung	mm
s_{Bohrung}	Sicherheitsbereich um Bohrung	mm
s_{Rand}	Sicherheitsbereich um Rand	mm
t_h	Hauptnutzungszeit	s
T	Tiefe	mm; cm; m
$V_{0\text{Ballen}}$	Ballenvolumen (unverdichtet)	m ³
V_1	Grundmenge (unverdichtet)	m ³
V_{Ballen}	Volumen eines verdichteten Ballens	m ³
V_{BLKW}	Grundmenge (unverdichtet) LKW	m ³
V_{Bohrer}	Volumen Bohrer	m ³
$V_{H\text{Ballen}}$	Volumenvergrößerungsfaktor	-
$V_{\text{Laborprobe}}$	Benötigte Laboratoriumsprobe (unverdichtet)	m ³ ; L
$V_{\text{Laborprobe-k}}$	Benötigte Laboratoriumsprobe (verdichtet)	m ³
V_{MinEP}	Mindestvolumen Einzelprobe (unverdichtet)	L
V_{VE}	Volumen Volumenelement	m ³
x, x_i, x_1	x-Achse, Punkt auf der x-Achse	mm, cm, m
x_{max}	Maximaler Wert in positiver Richtung auf der x-Achse	mm, cm, m
y, y_i, y_1	y-Achse, Punkt auf der y-Achse	mm, cm, m
y_{max}	Maximaler Wert in positiver Richtung auf der y-Achse	mm, cm, m
z, z_i, z_1	z-Achse, Punkt auf der z-Achse	mm, cm, m

1 Einleitung

Konsumgüter werden immer komplexer gestaltet. Dadurch hat sich die weltweite Abfallzusammensetzung stark verändert. Im Bereich der Verpackungen werden verschiedene Werkstoffe verwendet, um neben dem Transportschutz die Hygienebedingungen zu gewährleisten. Hat die Verpackung ihre Funktion erfüllt, wird diese vom Verbraucher in das entsprechend vorgesehene Entsorgungssystem gegeben.

Der vom Bürger mehr oder weniger gut sortierte Abfall wird in festgelegten Abfuhrhythmen zur ersten Behandlungsstufe transportiert. Dies sind neben mechanisch-biologischen-Abfallbehandlungsanlagen, Kompostierungsanlagen und Müllheizkraftwerken vorrangig Sortieranlagen zur Vorbereitung eines Recyclingprozesses. Allen Abfallarten ist gemein, dass sie möglichst verdichtet transportiert werden sollen, um ein optimales Verhältnis zwischen transportiertem Gewicht und zurückgelegter Strecke zu erreichen. Ziel ist es, so viel Masse wie möglich zu erfassen, um eine Vollausslastung des Transportfahrzeuges zu ermöglichen. Für den Transport der Produkte auf LKW, Schiffen oder Güterzügen ist eine Verdichtung mit Ballenpressen unerlässlich. Daraus entstehende Ballen besitzen optimierte Abmessungen für den Transport.

Aus dem Sortierprozess resultierende Anforderungen der Recycler an die Produkte, wie bspw. Störstoffgehalt, sind heute nur mit hohem Aufwand prüfbar. Ausgewählte Ballen werden händisch und willkürlich¹ sortiert. Geregelte und reproduzierbare Probenahmestrategien sind nicht erkennbar. Eine Alternative schafft das Verfahren der Ballenbeprobung. Dieses wurde von Herrn Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Poerschke und mir 2012, im Rahmen des 5. Sekundärrohstoff-Workshop an der Hochschule Nordhausen, erstmals vorgestellt. In dem dreijährigen ZIM-Projekt des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie „Entwicklung einer Apparatur zur repräsentativen² Beprobung von verdichteten Sekundärrohstoffen in Form von Ballen - Ballenbeprobung (Förderkennzeichen: KF2119909KO4)“ konnte dieses Verfahren seit 2014 entwickelt werden. Diese Dissertation beinhaltet wesentliche Forschungsergebnisse und geht über die Apparateentwicklung hinaus. Das Projekt endete am 30. April 2017.

Eine Herausforderung stellt die willkürliche Beprobung und der hohe Zeitaufwand in der Probenahme dar. Zunächst werden die Ziele der neuen Verfahrensentwicklung sowie der Ist-Stand der Qualitätssicherung von Ballen beschrieben. Anschließend sind die Ballencharakteristiken auf Grundlage von Besuchen bei Sortierern und Recyclern beschrieben. Darauf aufbauend wurden ausgewählte Probenahmemethoden für Sekundärrohstoffe erläutert.

¹ Vgl. Bibliographisches Institut GmbH, (Willkür, 2017), o. S.

² Vgl. Kapitel 4.2.

Für die Herstellung der unterschiedlichen Ballenarten wird auf einen vielseitigen Maschinenpark zurückgegriffen. In diesem verhalten sich die eingesetzten Stoffgemische unterschiedlich, was sich auf die Eigenschaften während des Pressvorgangs und auf Probenahmen auswirkt.

Ein Ballen ist ein Körper, der in drei Dimensionen zufallsgeneriert³ beprobt werden kann. Hierbei muss die Anzahl der Bohrungen und das Bohrvolumen dem entsprechenden Balleninhalt angepasst werden. Die Randbereiche und die unterschiedlichen Ballengrößen und Bindungen werden betrachtet. Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Bohrergrößen sind ebenfalls getätigt. Das im Rahmen der vorliegenden Dissertation neu entwickelte Verfahren der „Ballenbeprobung zufallsgeneriert“ wird im weiteren Verlauf auf ausgewählte Probenahmerichtlinien/-normen übertragen.

Einen großen Einfluss auf die Probenahme hat die Bohrtechnik. Eingesetzte Bohrwerkzeuge sind entsprechend den Inhaltsstoffen der untersuchten Ballen ausgelegt. Die Produktspezifikationen des Grünen Punktes bilden die aktuellen Qualitätsanforderungen der Hersteller und Recycler an die recyclingfähigen Wertstoffe in Ballenform ab. Mit der Versuchseinrichtung für Bohrer sind Richtwerttabellen bestimmt und Abhängigkeiten wie bspw. Mindestanzahl von Bohrungen und Mindestdurchmesser detektiert. Wie mit auftretenden Verschmelzungserscheinungen umzugehen ist, ist umfangreich erörtert.

Um die Funktionsweise des Verfahrens in einer noch zu bauenden automatisierten Maschine zu erläutern, ist ein Konzept für einen Ballenbeprober und einen Simulationsstand sowie die dazugehörige Software im Rahmen von betreuten Bachelorthesen erstellt worden. Die Steuer- und Erkennungstechnik ist Bestandteil einer repräsentativen Probenahme. Für den Zufallsgenerator und für die Steuerung liegen detaillierte Programmablaufpläne vor. Auf Grundlage dessen kann eine Software von Programmierern geschrieben werden.

Im Sommer 2015 ist die Ballenbeprobung in den DIN Arbeitsausschuss NA 062-05-83 AA „Sekundärbrennstoffe“ zur Bearbeitung gegeben worden. Die vorliegende Dissertation gibt Vorschläge zur Normung, zu dem anzuwendenden Probenregime und dem Verfahren der Ballenbeprobung.

³ Vgl. Bibliographisches Institut GmbH, (Zufallsgenerator, 2017), o. S.

2 Zielstellung der neuen Verfahrensentwicklung und Ist-Stand der Ballen-Qualitätssicherung

Moderne Recyclingbetriebe verarbeiten jährlich mehrere tausend Tonnen Sekundärrohstoffe in Form von Ballen. Um ausreichend Kenntnis über die Inhaltsstoffe pro LKW-Ladung zu erlangen, finden regelmäßige Beprobungen der Lieferung statt. Derzeit sind 31 Fraktionen⁴ für unterschiedliche Wertstoffe nach den Richtlinien der Firma „Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (DSD)“ bekannt. Gelegentlich werden Produktspezifikationen bilateral zwischen einem Sortierbetrieb und dem Recycler⁵ festgelegt. Diese Vereinbarungen sind von Prüfinstituten zu kontrollieren. Nach § 6 Abs. 3 VerpackV sind zehn duale Systeme anerkannt (Stand August 2016). Der Grüne Punkt ist der Marktführer.⁶ Im Kontext werden daher die Produktspezifikationen des Grünen Punktes verwendet.

In Abb. 1 sind exemplarisch ein PET- und ein Schaumstoffabfallballen dargestellt. Die Herstellung, der Transport und die Aufbereitung dieser Ballen fallen unter das Abfallrecht, sodass die Inhaltsstoffe Abfälle sind. Dies gilt für Siedlungs- und Gewerbeabfälle. Da recyclingfähiger Abfall eher als Wertstoff anzusehen ist, wird dieser Begriff im Zusammenhang des Recyclingbetriebes verwendet.



Abb. 1: PET-Hohlkörper und Schaumstoffabfall in Form von Ballen.

Die Inhaltsstoffe sind in den Ballen heterogen verteilt. Dies liegt an der nicht gleichen Korngröße sowie der unterschiedlichen Materialbeschaffenheit und -art. Gründe hierfür sind zum einen die äußerst vielfältigen Verpackungsmöglichkeiten und eine darauf angepasste Sortierung. Neben Metallen oder Mineralien können mit Treibmitteln beladene Dosen aus dem Baubereich in die Ballen gelangen. Diese Materialien schaden den Aufbereitungsapparaten und führen mitunter zu Ausfällen der gesamten Anlage. Die in den letzten Jahren geführten Gespräche mit Anlagenbetreibern, Sortierern und Recyclern, hatten als Ergebnis eine nachvollziehbare Abnahme der gelieferten Produktqualitäten. Grund hierfür ist u. a. die kurze Optierung⁷ für Sortieranlagen und die damit verbundene Vernachlässigung der Sortiertechnik.

⁴ Fraktionen = Gruppen von Materialien mit festgelegten Inhaltsstoffen.

Vgl. Anhang A: Daten Ballendimensionen, Anhang E: Ballenlexikon.

⁵ Unter Recycler werden im Folgenden Stoffverwerter verstanden, die sortierte Abfälle resp. Sekundärrohstoffe einsetzen und daraus Produkte generieren.

⁶ Vgl. Der Grüne Punkt, (Ein Vordenker der Kreislaufwirtschaft, 2017), o. S.

⁷ Die Ausschreibung und Vergabe eines Sortierauftrages für ein definiertes Gewicht an Verpackungsabfällen, vom Dualen System Deutschland an einen Sortierbetrieb, ist zeitlich befristet.

2.1 Zielstellung der neuen Verfahrensentwicklung

Während der Projektarbeiten in Sortier- und Recyclinganlagen entstand in den Jahren 2011/2012 die Idee zur Ballenbeprobung. Im Rahmen von Drittmittelprojekten wurden in dieser Zeit verschiedene Apparate zur Sortierung von Leichtverpackungen entwickelt. Obwohl die Anlagentechnik gut funktionierte, war die Mehrzahl der Anlagenbetreiber unzufrieden mit der Qualität der sortierten Materialien. Auf Rückfrage, wie sie die schlechte Qualität definieren, gaben Sortierer an, gehäuft von außen unauffällige Ballen vom Recycler zurücknehmen zu müssen, weil die Produktspezifikationen nicht stimmen. Es entstand ein Dialog zwischen Sortierern und Recyclern mit gegenseitigen Besuchen der Anlagen. Seither steigt der getätigte Aufwand hinsichtlich des Einsatzes einer händischen Beprobung von Ballen an. Diese sind allerdings willkürlich und mit einem hohen Zeitaufwand für die verantwortlichen Mitarbeiter verbunden. Das zu entwickelnde Verfahren der Ballenbeprobung soll u. a. den Zeitaufwand und die Willkür in der Probenahme anhand einer zufälligen Entnahme von Volumenelementen (VE) reduzieren. Als Volumenelement wird im weiteren Verlauf dieser Dissertation ein zylindrischer, dreidimensionaler Körper bezeichnet, der als Ganzes oder zerkleinert vorliegen kann.⁸ Der Ausdruck „Bohrkern“ ist mit dem Ausdruck „Volumenelement“ gleichzusetzen und wird weiterhin im Kontext des Bohrers bzw. des Bohrens verwendet, da diese Bezeichnung etabliert ist. Probenahmen aus Stoffströmen unterliegen verschiedener Einflüsse. Im Rahmen der Qualitätssicherung sind Proben zu entnehmen, aus denen Kenntnisse hinsichtlich der Produkt-, Prozess- und Emissionsstörstoffe gewonnen werden können.⁹ Speziell zufällige Volumenelemententnahmen aus Ballen bewegen sich dabei in einem komplexen Spannungsfeld, siehe Abb. 2. Als Ergebnis der Probenahme soll eine repräsentative Laborprobe generiert werden, welche weiter aufbereitet und analysiert oder sortiert werden kann.

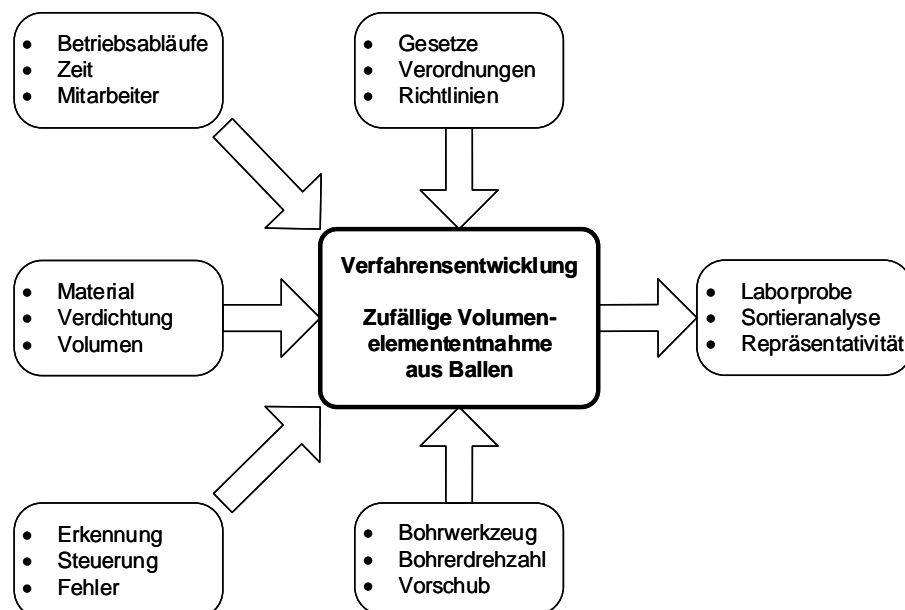


Abb. 2: Einflussgrößen auf die Verfahrensentwicklung.

⁸ Vgl. Kapitel 5.1.

⁹ Vgl. Martens, H., Goldmann, D., (Recyclingtechnik, 2016), S. 12.

Unmittelbare Konsequenzen für das wirtschaftliche Handeln des Betriebes haben Gesetze, Verordnungen und Richtlinien. Die Arbeitsaufgaben der Mitarbeiter und die Betriebsabläufe müssen aufeinander angepasst werden, damit sie wirtschaftlich darstellbar sind. Dabei ist ein effektives Handling des Ballenmaterials wichtig. Eine repräsentative Volumenentnahme muss robust ausgelegt und nicht störanfällig sein. Der Zeitaufwand ist dabei möglichst klein zu halten. Etwaige Fehler müssen durch das Probenahmesystem kompensiert, angezeigt und vermerkt werden. Kenntnisse zum Verhalten der eingesetzten Werkzeuge gegenüber dem Probenmaterial müssen vorhanden sein und ggf. von einer Probenahmeapparatur vorgegeben werden. Im Folgenden werden die grundsätzlichen Zielstellungen einer zufälligen Volumenelemententnahme aus Ballen erörtert.

2.1.1 Ziel 1 - Stoffliche Charakterisierung von Ballen

Vorsortierte oder ursprüngliche Haufwerke aus Leichtverpackungsabfällen werden in sogenannten Ballenpressen zu quader- bzw. rechteckförmigen Ballen gepresst. Anschließend ist das Volumen um ein Vielfaches verringert, das Material wird verdichtet. Im Bereich der Dualen Systeme werden Kunststoffe, Weißblech, Aluminium und PPK in Fraktionen¹⁰ eingruppiert. Je nach Produktspezifikation dürfen prozentuale Anteile an Störstoffen in den verdichteten Ballen enthalten sein. Störstoffe sind u. a. Materialien, die zwar als Leichtverpackungen gelten, allerdings nicht der Produktspezifikation entsprechen, Fremdmaterialien, Mineralik, Sonderabfälle, Restmüll oder kompostierbare Abfälle. Kritische Abfälle wie bspw. Bauschaumdosen, Windeln, massive Eisenmaterialien, Steine oder Tierkörper können die Aufbereitungs- und/oder Recyclinganlage stören und Produktionsausfälle verursachen.

Ziel ist es, den Pressvorgang der Ballen grundlegend zu beschreiben und die Wechselwirkungen zwischen der Herstellung mit verschiedenen Ballenpressen aufzuzeigen. Es wird überprüft, ob die Ballen von verschiedenen Herstellern ähnlich sind oder Unterschiede in zu definierenden Bereichen auftreten. Des Weiteren ist darzustellen, wie viele Fraktionen aktuell sortiert und verpresst werden. Daraus sind angepasste Vorgehensweisen für Verfahren und Bohrtechniken zu generieren.

2.1.2 Ziel 2 - Erhöhung der Proben-Aussagekraft anhand einer zufallsgenerierten Volumenelemententnahme

Ein neu zu entwickelndes Verfahren zur Beprobung von Ballen muss den aktuell geltenden Gesetzen, Verordnungen und Richtlinien für den Abfallbereich genügen. Der Zeitaufwand für die Probenahme muss so gestaltet werden, dass dieser die gängigen Betriebsabläufe nicht negativ beeinträchtigt.

Ziel ist eine Erhöhung der Aussagekraft einer genommenen Laborprobe bei gleichzeitiger Verringerung der Probenahmezeit unter Anwendung eines Zufallssystems. Dabei soll es unerheblich sein, ob die genommene Laborprobe im Anschluss händisch oder

¹⁰ Stand 31.07.2017.

maschinell ausgewertet wird. Eine weitere Reduzierung der Probenmenge hin zur Analysenprobe, z. B. unter Anwendung der Pressbohrmethode¹¹, soll ermöglicht werden. Das Zufallssystem ist bereits bei der Auswahl von Ballen aus unterschiedlichen Lager- und Transportsituationen anzuwenden. Ein weiteres Ziel ist die Darstellung der Bedingungen zur Probenahme aus Ballen, wie bspw. die Beachtung der Rand- und Sicherheitsbereiche sowie der Bindungen. Es ist im weiteren Verlauf zu prüfen, ob das neu entwickelte Verfahren auf bereits bestehende Probenahmევorschriften übertragen werden kann. Zudem soll das Verfahren den Normungsprozess „Feste Sekundärbrennstoffe – Gewinnung repräsentativer Laborproben aus heterogenen Stoffen nach der Ballenbeprobung“ unterstützen. Dafür werden in der Dissertation die benötigten Punkte aufgeführt.

2.1.3 Ziel 3 - Auslegung von Bohr- und Steuerungstechniken

Verschiedene Bohrertypen sollen untersucht werden, um für den jeweiligen Ballen die beste Bohrtechnik bereitstellen zu können. Demzufolge sind neue, auf das Verfahren abgestimmte, Bohrer zu entwickeln, welche den Zeit- und Analysekriterien entsprechen. Speziell für die Analyse der Proben bezüglich des Chlorgehaltes sind geringe Temperaturen am Bohrkopf anzustreben, da flüchtige Chlorbestandteile bereits bei einer Temperatur von 40 °C aus dem Material entweichen können. Ebenfalls müssen Verschmelzungen verhindert werden, da diese eine vollständige Separierung der im Volumenelement enthaltenen Materialien verhindern. Der verwendete Bohrer soll robust genug gegen Störstoffe sein und diese idealerweise zerschneiden sowie austragen.

Ziel ist es, dem Sortierer und dem Recycler Ballenbeprobungsverfahren anzubieten, welche stationär (fest im Betrieb installiert) oder mobil (ortsveränderbar) angewendet werden können. Ferner sollen in dieser Dissertation Lösungswege zur Gestaltung einer optimierten Bohr- und Steuerungstechnik gegeben werden, die von entsprechend fachlich geeignetem Personal in eine Maschine umgesetzt werden kann. Dazu ist der grundlegende Ablauf einer automatisierten Probenahme beispielgebend darzustellen.

¹¹ Vgl. Kapitel 4.2.6.

3 Ausgangssituation und Praxisbeispiele sowie Darstellung von Defiziten

Das Duale System in Deutschland gibt seit 1991 Qualitätsanforderungen für Rohstoffe aus dem Recyclingbereich, hier Leichtverpackungen, vor. Seit 2010 stehen die Wirtschaftlichkeit und Qualität der sortierten Fraktionen im Widerspruch. Das Recyclingsystem wird lediglich über Masse definiert und nimmt unzureichend Rücksicht auf die Qualität. Höhere Qualitäten in den Kunststofffraktionen erfordern jedoch einen höheren Einsatz von Kapital für Investitionen in den Maschinenpark. Diese Investitionen fallen durch die anhaltende Wettbewerbssituation zwischen den einzelnen dualen Systemen gering aus. Ein der geforderten Qualität entsprechender Kapitalaufwand ist im Kontext des Wettbewerbes für die Mehrzahl der Unternehmen nicht darstellbar.¹² Der Lieferant von sortierten Leichtverpackungen ist in der Regel nicht verpflichtet, eine Qualitätssicherung der erzeugten Ballen durchzuführen, diese hat alleinig der Recycler zu tragen. Bei Nichteinhaltung der geforderten Qualitäten muss der Recycler über mehrere administrative Instanzen die Zurückweisung der Ware veranlassen. Entstehende Prozesskosten können nur bedingt an den Lieferanten weitergegeben werden. In Abb. 3 ist der Anteil nichtspezifikationsgerechter Mischkunststoffanlieferungen in Prozent über die Zeit abgetragen. Zwischen 2005 und 2007 geht dieser Anteil leicht nach oben, während er von 2008 bis 2010 einen Rückgang zugunsten der Qualität verbucht. Ab 2010 steigt der Anteil deutlich an, sodass im Jahr 2015 kein geprüfter Mischkunststoffballen spezifikationsgerecht war. Für das Jahr 2013 liegt kein Datensatz vor.

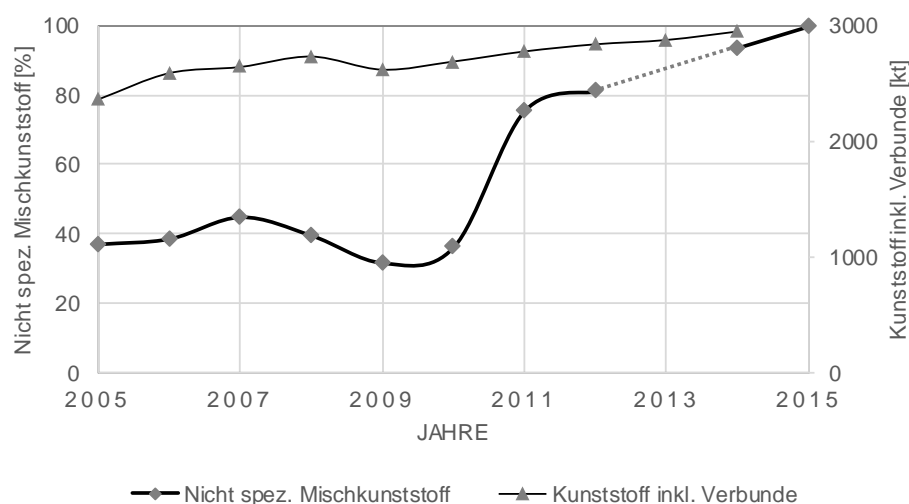


Abb. 3: Mischkunststoffanlieferungen und Entwicklung Kunststoffaufkommen.

Eigene Darstellung anhand Quelle: Textor, D., (Quote, Qualität, Produkt, 2016), S. 9.; Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, (Entwicklung des Verpackungsaufkommens in tausend Tonnen, 2016), o. S.

Die Entwicklung zwischen 2012 und 2014 verläuft linear, siehe gestrichelte Linie in Abb. 3. Werden die Verwertungsquoten der Dualen Systeme für das Jahr 2014 herangezogen, dann ist ersichtlich, dass wesentlich mehr Leichtverpackungen verwertet wurden als durch die Vertragsmenge der Dualen Systeme geregelt war. Demnach waren 2014

¹² Vgl. Textor, D., (Quote, Qualität, Produkt, 2016), S. 6.

rund 1,155 Mio. Tonnen Leichtverpackungen lizenziert¹³. Davon wurden 1,616 Mio. Tonnen¹⁴ verwertet. Daraus ergibt sich eine Verwertungsquote von rund 140 %.¹⁵ Eine Gegenüberstellung der Verwertungsquote von 2014 für Leichtverpackungen in Höhe von 140 % und den nicht spezifikationsgerechten Mischkunststoffballen mit 94 % lässt den Schluss zu, dass die 2014 bestehende Sortierleistung nicht für diese Menge an Leichtverpackungsabfällen ausgelegt war.¹⁶

3.1 Probenahme nach den Richtlinien des Grünen Punktes

Probenahmen setzen bisher eine optische Auswahl zu beprobender Ballen durch den Menschen voraus. Ausgewählte Ballen werden anschließend von einem Team beprobt. Die Anzahl der mit der Beprobung beschäftigten Mitarbeiter liegt zwischen zwei und drei Personen. Der benötigte Arbeitsraum wurde während der Forschungstätigkeit ausgemessen und ist in Abb. 4 dargestellt.

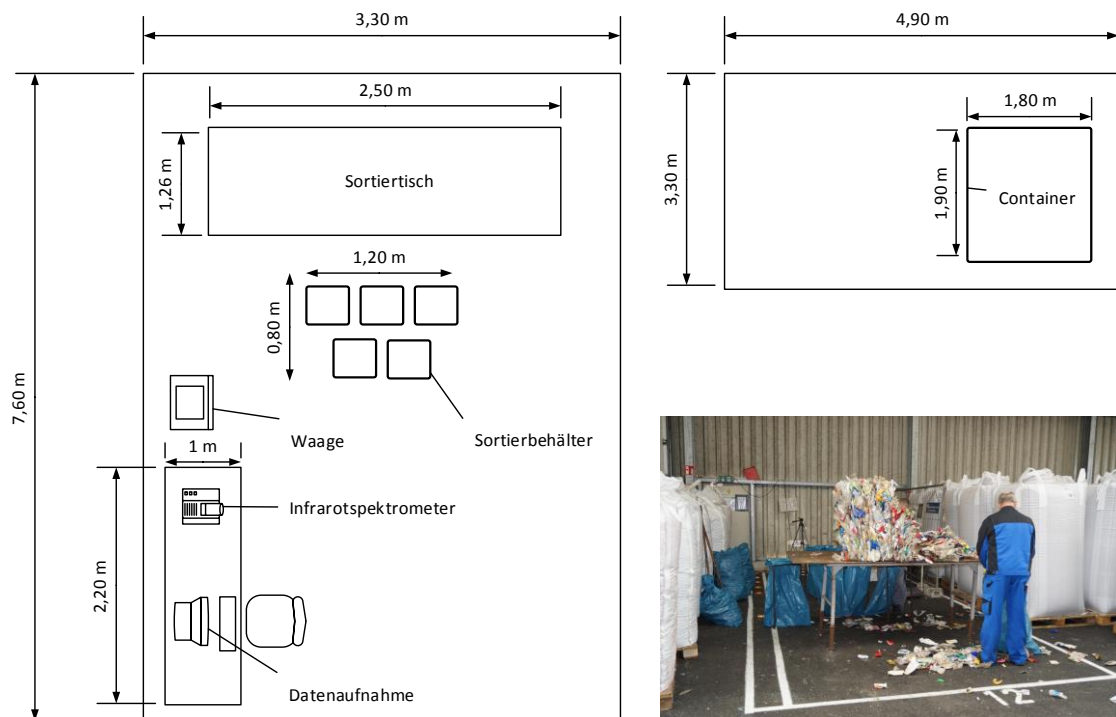


Abb. 4: Arbeitsbereich für die Probenahme aus einem Ballen.

¹³ Eine Produktverpackung mit dem „Grünen Punkt“ gilt als lizenziert. Im Verkaufspreis sind die Kosten enthalten, die für das Recycling der Verpackung notwendig sind.

¹⁴ In den Zahlen sind keine Branchenlösungen, Eigenrücknahmen, Zuschätzungen und Abschläge enthalten.

¹⁵ Vgl. Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, (Verwertungsquoten der Dualen Systeme 2014, 2014), o. S.

¹⁶ Vgl. Umweltbundesamt, (Verpackungsabfälle, 2016), o. S.

Folgende Arbeitsschritte sind bei der Probenahme aus Sicht des Balleneinkäufers¹⁷ zu befolgen:

Phase 1: Nach der Kontrolle der Lieferform sowie der Ballenkennzeichnung wird der Ballen mittels Gabelstapler vom LKW abgeladen und auf die Probefläche gestellt. Üblich ist die Entnahme eines Ballens aus einem Ballenlager.

Phase 2: Die Mitarbeiter stellen Behälter für die zu sortierenden Fraktionen und eine Waage bereit. Zur Erkennung von nicht klar identifizierbaren Inhaltsstoffen wird ein mobiles Infrarotspektrometer verwendet.

Phase 3: Anschließend werden die Ballenbindungen unter Zuhilfenahme eines Bolzenschneiders aufgetrennt. Dieser Vorgang ist gefährlich, da die Bindungen unter Zugspannung stehen und nach dem Auftrennen in Richtung des Mitarbeiters ausschlagen können. Deshalb fixiert das Transportgerät, meist ein Gabelstapler, den Ballen in Pressrichtung¹⁸.

Phase 4: Wird der Ballen nicht mehr von den Bindungen gehalten, kann eine Zerlegung stattfinden. Dies geschieht entweder händisch oder mit Hilfe von Staplern bzw. Radladern. Der Ballen wird halbiert und anschließend auf einen Sortiertisch gestellt.

Phase 5: Aus dem Balleninneren werden willkürlich 80 kg bis 100 kg entnommen, fraktionsweise sortiert und ausgewogen. Dabei muss ein stark vergrößertes Volumen beprobt werden, welches nicht mehr dem des ursprünglichen Ballens entspricht.¹⁹ Die entnommene Menge umfasst in etwa ein Viertel des Ballens.

Phase 6: Sind alle Fraktionen ausgewogen, wird die Massenbilanz gebildet und mit der vorliegenden Produktspezifikation verglichen. Auf Grundlage dieser Auswertung ist zu entscheiden, ob weitere Ballen dieser LKW-Ladung beprobt werden müssen. Bevor eine Reklamation stattfinden kann, muss mindestens noch ein Ballen negativ auffallen. Es sind maximal drei Ballen zu beproben.

Phase 7: Nachdem alle Auswertungen vollzogen und eine Entscheidung über die Annahme oder Reklamation der LKW-Ladung getroffen ist, können geöffnete Ballen ggf. in den Produktionskreislauf gegeben werden. Dies ist unabhängig davon, ob der Ballen die Produktspezifikationen erfüllt oder nicht. Administrativ sind weitere Schritte einzuleiten, damit die im Vorfeld abgestimmten Zahlungsströme ausgelöst oder bei einer Reklamation der LKW-Ladung Ausgleichszahlungen erfolgen können.

Gespräche mit den Prüfteams haben ergeben, dass zur Bearbeitung pro Ballen mehrere Stunden benötigt werden. Die Zeiten können, je nach Fähigkeit des Prüfpersonals und Produktspezifikation des Ballens, schwanken. Geschulte Teams benötigen pro Ballen

¹⁷ Die Probenahme inklusive Qualitätskontrolle kann durch ein externes oder internes Prüfteam durchgeführt werden.

¹⁸ Als Pressrichtung wird die Richtung der wirkenden Kraft auf den Ballen in der Presse bezeichnet. Verpackungen, die auf den zwei Pressrichtungsseiten zu sehen sind, erscheinen großflächig zerdrückt. Auf den anderen Seiten sind dagegen hintereinander aufgereihte, scheibenförmige Verpackungen zu erkennen.

¹⁹ Vgl. Kapitel 4; Anhang A: Daten Ballendimensionen.

ca. zwei Stunden. Der hohe Zeitaufwand resultiert aus dem Umgang mit dem unverdichteten Ballenmaterial, da nach dem Öffnen der Bindung meist große Volumina vorliegen. Diese sind, entsprechend der Auflagefläche der genutzten Waage, aufzubereiten. Selten wird das lose vorliegende Ballenmaterial in der direkten Nähe des Inputbunkers der Recyclinganlage beprobt. Mehrere Kubikmeter müssen nach der Probenahme mit Radladern oder Gabelstaplern innerbetrieblich transportiert werden. Dies erhöht zusätzlich den Aufwand für die Mitarbeiter und die Maschinenteknik.

Das Vorgehen ist willkürlich, da die Ballen nach eigenem Ermessen ausgewählt und die Probenmengen unbestimmt aus den Ballen entnommen werden. Stand der Technik ist die Qualitätsprüfung für Outputfraktionen aus der Sortierung von LVP-Sammelgemisch nach den Richtlinien des Grünen Punktes, ehemals DKR.²⁰ Demnach soll im Punkt „Analyse“ ein Ballen ausgewählt werden, der augenscheinlich repräsentativ für die Lieferung ist. Es wird nicht erläutert, ob diese Auswahl bereits auf dem LKW oder nach dem Abladevorgang erfolgt. Des Weiteren kann der Qualitätsprüfer lediglich die äußeren Sichtbereiche der angelieferten Ballen optisch kontrollieren. Dieser Sachverhalt ist in der Branche bekannt und wird genutzt. Beobachtungen und Rückfragen haben ergeben, dass die zum Verkauf bestimmten Ballenprodukte optimiert werden. Hierzu werden überstehende oder nicht dem Ballenprodukt zugehörige Teile von den äußeren Sichtbereichen händisch entfernt. Repräsentative Aussagen, bezogen auf eine rein optische Prüfung von außen, können spätestens nach diesem Eingriff nicht mehr getätigt werden. Ferner beinhalten die sichtbaren Bereiche nur einen Bruchteil der angelieferten Gesamtmasse, sodass nach einer erfolgten optischen Kontrolle praktisch keine Erkenntnis über den Balleninhalt vorliegen kann. Im vorliegenden Beispiel, in Tab. 1, liegt ein Ballen der Produktspezifikation 325 PET-Flaschen vor. Dieser muss mindestens einen Gutanteil²¹ von 98 M.% erreichen. Der Ballen besitzt einen erhöhten Prozentsatz an Folien. Feinkornanteile, welche ca. 40 mm und kleiner sind, bleiben außer Betracht. Da der Gutanteil im vorliegenden Beispiel 94,17 M.% beträgt, wird der Ballen abgelehnt.

Tab. 1: Ergebnisse einer Probenahme - Produktspezifikation 325 PET-Flaschen.

Inhaltsstoff	Gewicht [kg]	Anteil [M.%]
FE	0,1	0,12
PE	0,2	0,24
EPS	0,2	0,24
Folie	2,8	3,33
Reststoffe	1,6	1,90
Gutanteil	79,3	94,17
Gesamt	84,2	100

Die Richtlinie des Grünen Punktes zur Qualitätsprüfung für Outputfraktionen aus der Sortierung von LVP-Sammelgemisch verweist als Grundlage für die Probenahme auf die

²⁰ Vgl. Der Grüne Punkt, (Qualitätsprüfungsschema, 2016), S. 1.

Die DKR Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH und die DSD Resource GmbH sind auf die Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (DSD) verschmolzen worden. Stand August 2016.

²¹ Anteil, der den Produktspezifikationen entspricht.

Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen (LAGA PN 98). Allerdings findet diese in Bezug auf die Sortierung von Abfallstoffen mit einer Korngröße von > 120 mm keine Anwendung. Mittlere Korngrößen für bspw. Mischkunststoffe liegen zwischen 250 mm und 300 mm. Aus diesem Grund verweist die LAGA PN 98 auf die Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik Sachsen²². Dort werden zwar die ausgenommenen Abfallstoffe behandelt, allerdings nur in Form von Sortierresten. Die Untersuchung der Sortierreste unter Einsatz der Richtlinie Abfallanalytik dient zudem der Leistungsfähigkeitsprüfung der untersuchten Anlage. Eine Anwendung auf sortierte Fraktionen, die keine Sortierreste sind, ist damit nicht darstellbar.

3.2 Sortieranalyse der GBP Quality GmbH

Wegen der sich verringernden Qualitäten im Bereich der Rohstoffe für Kunststoffrecyclate gründeten acht führende Kunststoffrecycler²³ die GBP Quality GmbH. Die GBP Quality GmbH kritisiert die veralteten Sortierkriterien der DSD, die in den Grundzügen aus dem Gründungsjahr 1991 stammen. Ein Forderungskatalog aus dem Jahr 2013 sieht u. a. vor, dass Kunststoffabfälle nicht mehr unüberdacht²⁴ zu lagern seien und zu feuchte Materialien zurückzuweisen sind. Einer der ersten Schritte der Gesellschaft ist die Dokumentation der Ballenware und das Sammeln von objektiven Daten. Eine Kooperation mit der Hochschule Magdeburg-Stendal, unter Leitung von Frau Prof. Gilian Gerke, soll dieses Vorhaben wissenschaftlich unterstützen.²⁵

Es werden von der Gesellschaft repräsentative Stichproben des angelieferten Materials gezogen und diese mit den betreffenden Produktspezifikationen verglichen. Im Ergebnis liegt eine i. d. R. unabhängige Analyse zur Qualitätskontrolle und -verbesserung vor. Der Auftraggeber (Kunststoffrecycler) erhält die Ergebnisse zur weiteren Verfügung.²⁶ Insgesamt werden bis zu 40 kg aus dem Ballen als Probe entnommen.

Im ersten Schritt der Sortieranalyse erfolgt die Auswahl eines oder mehrerer Probeballen. Anschließend wird eine händische Sortieranalyse in mehreren Schritten durchgeführt, welche mit vier Fotos an festgelegten Stationen belegt wird. Die Probenahme wird wiederholt, um das Ergebnis zu verifizieren (Doppelbeprobung). Der Folienballen 310-1 entspricht nicht der Produktspezifikation, da das Gutmaterial mit 80,26 M.% deutlich unter den geforderten 92 M.% liegt.²⁷ Einen hohen Einfluss auf die geringe Qualität hat der Anteil an sonstigen Metall-Artikeln, Kunststoffen hart sowie sonstigen Reststoffe. Letztere überschreiten mit 10,26 M.% den Grenzwert von $\leq 4,0$ M.% erheblich. Der Metallgehalt sollte wesentlich geringer ausfallen. Hier liegt der Grenzwert bei $\leq 0,5$ M.% und ist mit 3,31 M.% fast sieben Mal so hoch wie erlaubt.

²² Vgl. INTECUS GmbH, (Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen, 2015), S. 19.

²³ Vgl. GBP Quality GmbH, (Organisation, 2016), o. S.

²⁴ Inzwischen vom Grünen Punkt berücksichtigt.

²⁵ Vgl. BVSE, (GBP Quality GmbH gegründet, 2016), o. S.

²⁶ Vgl. GBP Quality GmbH, (Sortieranalysen, 2016), o. S.

²⁷ Vgl. Anhang B: Ablauf Sortieranalyse GBP Quality GmbH.

3.3 Nationales Kunststoff-Recyclingkonsortium COREPLA (Italien)

Neben dem Grünen Punkt und anderen Prüforganisationen sind im europäischen Ausland ansässige Organisationen, in diesem Fall Italien, mit der Qualitätsprüfung beauftragt. COREPLA wurde 1997 gegründet und organisiert rund 2600 Mitgliedsunternehmen aus der Kunststoffverpackungsbranche. Die Firma ist wiederum Teil des italienischen Verpackungskonsortiums CONAI.²⁸

Wird ein deutscher Recyclingbetrieb von einem der COREPLA angebundenen Unternehmen beauftragt Verpackungsabfall aus Italien zu recyceln, kann ein zweiköpfiges Prüfteam zu dem betreffenden Recyclingunternehmen entsandt werden. Dieses untersucht zwei Ballen aus der betreffenden Lieferung. Dafür werden beide Ballen zerschnitten und das jeweilig freiliegende Material aufgehäuft. Mittels Teilerkreuzes wird das entstandene Haufwerk reduziert. Insgesamt müssen mindestens 50 kg Probenmaterial entnommen werden.²⁹ Auf einem Gittertisch werden die Materialien entsprechend den Vorgaben sortiert, sodass fünf Haufen entstehen. Als Störstoff ist u. a. Plastik ausgewiesen, welches nicht aus dem Bereich der lizenzierten bzw. dafür vorgesehenen Verpackungen stammt. Der Anteil darf 6 M.% nicht überschreiten. Inertes Material, Nichteisenmetalle und andere Materialien dürfen mit maximal 2,5 M.% vorliegen. Eisenmetalle dürfen bis max. 1,5 M.% enthalten sein.

Laut vorliegendem Protokoll wurde der Maximalwert an nicht lizenzierten bzw. vorgesehenen Verpackungen aus Plastik überschritten. Alle anderen Störstoffanteile lagen unter den Grenzwerten. Insgesamt lag der Anteil der Menge, die keine Verunreinigungen oder Fremdfractionen aufwiesen, bei 90,52 M.%. Sobald ein Störstoffgrenzwert überschritten wird, gilt die untersuchte Fraktion als nicht konform.

3.4 Probenahme in einer Sekundärrohstoff-Aufbereitung

In den befragten Betrieben sind grundsätzlich Anlieferungen optisch zu kontrollieren. Dabei wird festgestellt, ob das Material vor kurzem verdichtet oder längere Zeit gelagert wurde. Anhand von ankompostiertem Material, starker Geruchsentwicklung oder verrosteten Ballendrähten ist eine längere Lagerung im Freien zu erkennen. Aus drei Anlieferungen per LKW sind zwei bis drei Ballen gesondert zu lagern. Diese Ballen werden als Monocharge durch die im Vorfeld leergefahrene EBS-Aufbereitungsanlage gefahren. Eine Aufbereitung der Mischkunststoffballen findet mit Metallabscheidern und Windsichtern statt. Im Prozess erfolgen die nicht zufälligen Probenahmen mit meist automatisierten Probenehmern. Dabei werden die einzelnen Proben zu einer Mischprobe zusammengeführt, gemäß LAGA PN 98 reduziert und eine Teilprobe zur Analyse bezüglich des Energiegehaltes und der potenziellen Schadstoffe wie bspw. Chlor in ein zertifizier-

²⁸ Vgl. Kunststoffweb GmbH, (K-Recycling, 2016), o. S.

²⁹ Vgl. Anhang C: Probenahmeprotokoll COREPLA Italien.

tes Labor gesendet. Nicht selten verfügen EBS-Aufbereitungsanlagen über mehrere Aufbereitungslinien mit unterschiedlichen Abscheideaggregaten. Für die oben beschriebene Qualitätskontrolle ist eine Linie ca. eine Stunde nicht nutzbar. Wird im laufenden Betrieb eine Verschlechterung der Qualität festgestellt, kann der Massenstrom auf eine der Materialqualität angepasste Aufbereitungslinie umgeleitet werden. Dies löst unmittelbar eine entsprechende Reklamation beim Kunden aus. Eine Reklamation des Ballenmaterials ist bei dieser Vorgehensweise nicht möglich. Ist eine Lieferung nicht unmittelbar organoleptisch auffällig, wird das Material in jedem Fall durch die Anlage gefahren. Die Qualitätskontrolle dient in erster Linie der Erstellung einer Laborprobe zur Vorbereitung einer Analyse der beinhaltenden Schadstoffe und des Heizwertes.

3.5 Beprobung von Ballen an der Montanuniversität Leoben

Die Montanuniversität Leoben beschäftigte sich unter Leitung von Herrn Dr. Mag. Martin Wellacher seit 2015 parallel mit dem Thema „BalSam (Ball Sampling)“, welches als Hauptziel die zerstörungsfreie, repräsentative Probenahme aus Ballen hat. Dabei soll die Methode für Korngrößen > 100 mm geeignet sein. Der Dotierungsstoff Molybdänsulfid wurde auf eine Polyethylenfolie aufgebracht, in definierter Menge der Kunststofffraktion zugegeben und anschließend zu zwei Ballen gepresst. Die Repräsentativität wurde via Standardabweichung und dem Bias überprüft. Eine konventionell hergestellte Probe ist aus einer Gesamtprobenmenge in Höhe von 600 kg händisch gezogen worden. Dem Ballen sind zwei mal 300 kg entnommen und zur Homogenisierung auf 30 mm zerkleinert worden. Aus dem jeweils zerkleinerten Material wurden willkürlich 20 Stichproben à 1,8 kg entnommen und nach der Probenahme zur Probenvorbereitung im Labor bei 105 °C getrocknet. Anschließend erfolgte mit einer Schneidmühle die Zerkleinerung auf 1 mm sowie durch Vierteilung die Verjüngung auf die Prüfmenge. Aus dem zweiten Ballen wurden 20 Bohrungen, bei einem Kernbohrerdurchmesser von 100 mm, mit einem jeweiligen Gewicht zwischen 0,5 kg und 2 kg entnommen und ebenfalls auf 30 mm zerkleinert sowie mit Teilerkreuz und Riffelteiler reduziert.³⁰ Dieses Verfahren wird von der Montanuniversität Leoben „direkte Ballenbeprobung“ genannt. Das Ergebnis zeigte, dass der Stand der Technik der „direkten Ballenbeprobung“ überlegen ist. Hohe Abweichungen ergaben die Messungen des dotierten Parameters über die Standardabweichung, beim Bias gab es Annäherungen. Dagegen zeigte die „direkte Ballenbeprobung“ bei anderen Parametern wie bspw. dem Heizwert eine geringe Abweichung von 5 %.³¹

Geringe Abweichungen bei den relevanten Parametern zeigen, dass das Verfahren der „direkten Ballenbeprobung“ prinzipiell funktioniert. Die Forscher der MU Leoben kommen zu einer anderen Schlussfolgerung bei Betrachtung des Dotierungsstoffes Molybdän. Dies ist dem Design der Studie und der Probenahme geschuldet. Es werden zweimal

³⁰ Vgl. Wellacher, M. et al., (Neue Methode zur Probenahme grobstückiger Abfälle aus Ballen, 2016), 623 ff.

³¹ Ebenda, S. 629 f.

300 kg zur Homogenisierung auf eine Korngröße von 30 mm zerkleinert. Dagegen beträgt die mit der „direkten Ballenbeprobung“ gewonnene und anschließend zerkleinerte Probe 36 kg, rund ein Zehntel der Vergleichsmasse. Aus der allgemeinen Probenahmetheorie zu heterogenen Schüttgütern ist bekannt, dass die Untersuchung der Gesamtmenge immer genauere Ergebnisse liefert, als eine Untersuchung einer Teilmenge aus der Gesamtmenge. Das Ergebnis muss auf dieser Grundlage zwangsläufig gegen die „direkte Ballenbeprobung“ sprechen. Richtig wäre die händische Entnahme einer gleichgroßen Menge und deren Vergleich mit der „direkten Ballenbeprobung“. Nicht überraschend ist die verhältnismäßig geringe Abweichung bei dem Parameter Heizwert. Der Ballen bestand aus bereits sortierten Mischkunststoffen, auf Grundlage der angeführten Bilder hauptsächlich Folien. Die in ausreichender Menge in dem Ballen vorliegenden Folien besitzen ähnliche Heizwerte.³² Des Weiteren werden Proben bei der „direkten Ballenbeprobung“ willkürlich entnommen, da keine Aufzeichnungen über die Entnahmepunkte in der angeführten Studie vorliegen und keine Informationen zum Vorgehen bei der Bohrpunktauswahl ersichtlich sind.



Abb. 5: Gemeinsamer Bohrtest HS Nordhausen und MU Leoben in Graz.

Zwischen der Hochschule Nordhausen und der Montanuniversität Leoben besteht seit dem 23.10.2012 ein Kooperationsvertrag. Im Rahmen des ZIM-Projektes „Ballenbeprobung“ der Hochschule Nordhausen wurden Ideen miteinander ausgetauscht. Kurz nach der entstandenen Idee zur Ballenbeprobung wurde versucht, ein gemeinsames Projekt zu initiieren. Dies scheiterte an diversen nationalen Förderhürden. Das Forschungsteam der Hochschule Nordhausen sagte dem Bereich Abfallverwertungstechnik und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben Unterstützung im Themenbereich der Probenahmetheorie und des spezifizierten Anlagenbaus zu. Neben wechselseitigen Besuchen in Nordhausen und Leoben konnten praktische Versuche begleitet werden. Die Ergebnisse der getätigten Bohrerkonstruktionen der Hochschule Nordhausen wurden für den Bohrerbau der Montanuniversität Leoben genutzt. In Abb. 5 sind auf der rechten Seite die gebauten Bohrer und auf der linken Seite die getätigten Bohrversuche dargestellt. Auf Grundlage des Tests in Graz im Oktober 2015 fiel die Entscheidung der Hochschule Nordhausen zur Konstruktion des im ZIM-Antrages ausgeschriebenen „Ballenbeprober Mobil“ mit einer Standard-Kernbohrmaschine.

³² Vgl. Wellacher, M. et al., (Neue Methode zur Probenahme grobstückiger Abfälle aus Ballen, 2016), S. 627 - 629.

3.6 Vorgehen bei der Papier-Pappe-Kartonage-Beprobung

Die TU Darmstadt PMV (Fachgebiet Papierfabrikation und Mechanische Verfahrenstechnik) hat zusammen mit der IfP (Institution for Paper Science an Technology) GmbH in dem vom AiF geförderten Projekt „Qualitätseigenschaften der wichtigsten Altpapierarten in Abhängigkeit von den Sortierbedingungen“ eine Maschine entwickelt, die mit Hilfe eines Kernbohrers Proben aus Altpapierballen entnimmt.

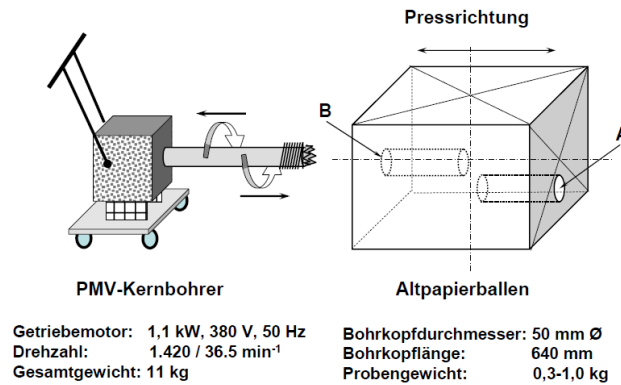


Abb. 6: Kernbohrmaschine für Papierballen mit Probenahmeschema.

Quelle: TU Darmstadt PMV / IfP GmbH, (AiF-Abschlussbericht 15408 N, 2010), S. 21.

In Abb. 6 ist eine Skizze der Probenahmemaschine zu sehen. Der Ballen wird in Pressrichtung beidseitig bis zur Mitte beprobt. Es werden zwei Kerne herausgebohrt und der Inhalt anschließend aus dem Kernbohrer ausgestoßen. Dabei beträgt der Kerndurchmesser ca. 50 mm. Des Weiteren hing die Anzahl der zu beprobenden Ballen von der Homogenität ab. Bei heterogenem Altpapier (Sorte 1.02 und 1.04) wurden fünf Ballen pro Lieferung beprobt, bei einer homogenen Zusammensetzung (Sorte 4.03) dagegen drei Ballen.³³ Dem Abschlussbericht zufolge fand die Beprobung des Ballens stets willkürlich statt. Es wurden keine Angaben zu den Positionen/Koordinaten der Bohrpunkte gegeben. Die Bohrkerns konnten in definierte Papierscheiben zerlegt werden, sodass eine händische Sortierung und Störstofferkennung möglich war.³⁴ Bei diesem Verfahren war die Bohrtechnik mit Problemen behaftet. Durch die hohe Hitzeentwicklung wurde ein signifikanter Teil des zu detektierenden Wassers verdampft, sodass dieses nicht mehr durch die in das Bohrloch eingeführte Messlanze erkannt werden konnte.

3.7 Beprobung von Biomasse-Ballen

Im landwirtschaftlichen Bereich werden Rundballen oder Rechteckballen verwendet. Inhalt der Ballen sind Futtermittel wie Heu oder Grassilage bzw. Einstreu aus Stroh. Aus diesen werden Proben, bspw. zur Bestimmung der Trockensubstanz, entnommen. Zentrale Probenahmegeräte sind Lanzen oder Stecheisen. Der Kern wird meist in der Länge des Ballendurchmessers als Ganzes entnommen. Die Zusammensetzung des Ballenmaterials im Biomassebereich ist als homogen anzusehen.

³³ Vgl. TU Darmstadt PMV, IfP GmbH, (AiF-Abschlussbericht 15408 N, 2010), S. 22.

³⁴ Ebenda, S. 21.

Für die Beprobung bspw. von Heuballen für Pferde sollen aus mehreren Ballen Stichproben entnommen werden. Die einzelnen Proben sind so zu vereinigen und zu mischen, dass ca. drei Liter als Laborprobe eingeschickt werden können.³⁵ Im Bericht wird nicht auf die Art und Weise einer stichprobenartigen Auswahl eingegangen, demnach ist der Probenahmeprozess willkürlich ausgelegt. In der Schweiz sind seit 2015 Probenahmen mittels Bohrkernbohrern bekannt, siehe Abb. 7. Es wird kein Zufallssystem zur Entnahme der Proben eingesetzt.



Abb. 7: Beprobung eines Heuballens in der Schweiz.

Quelle: Agrarforschung Schweiz, (Heu- oder Haylageproduktion von zwei Grasmischungen, 2015), S. 66.

Die Bohreinheit ist auf eine Frontladergabel montiert und besteht aus einem Motor mit Getriebe und einem Kernbohrer. Per Frontlader werden die gewünschten Positionen angefahren und der Vorschub realisiert. Genaue Angaben über die Geometrie des Bohrkopfes sind nicht aus Primär- oder Sekundärquellen zu ermitteln.

³⁵ Vgl. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, (Boden- und Futtermitteluntersuchung für Pferdehalter, 2016), S. 1.

4 Ballencharakteristik und ausgewählte Probenahmemethoden für Sekundärrohstoffe

Aufgrund der sich in den einzelnen Betrieben unterscheidenden Sortiertechnik, sind die Inhaltsstoffe und Abmessungen der Ballen nicht gleich. Die Wahl der jeweilig eingesetzten Ballenpressen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ballendichte und auf das Gewicht jedes Ballens. Diese Eigenschaften sind zwar den Anwendern bekannt, wurden bisher jedoch nicht in den Kontext einer Probenahme gesetzt. Aktuell gibt es keine allgemein gültige Richtlinie für Probenahmen aus Ballen, die unterscheidbare physikalische Parameter der Ballen berücksichtigt. Um zu verstehen, welche Wechselwirkungen auf die Inhaltstoffe von Ballen Einfluss haben, wurden ausgewählte Ballenpressen nicht nur anhand von Produktdaten untersucht, sondern die Funktionsweise bei Besuchen in Sortierbetrieben überprüft. Des Weiteren lieferten Gespräche bei Recyclingbetrieben und Sekundärbrennstoffherstellern Informationen für die Auswahl verwendeter Probenahmemethoden. Mit diesen Daten wird die Grundlage geschaffen, physikalisch unterscheidbare Eigenschaften in eine Probenahmemethodik einzubeziehen.

4.1 Charakterisierung und Klassierung von Ballen

Ausgangsstoffe für Ballen sind die Leichtverpackungen aus dem Bereich der Dualen Systeme. Diese werden bei den Bürgern erfasst und von Lohndienstleistern in vorgegebene Produkte mit ihren jeweiligen Qualitätsanforderungen sortiert.³⁶ In Abb. 8 ist ein Schema der Sortierung von LVP-Sammelware aufgezeigt. Die einzelnen Sortierapparate unterscheiden sich in den Sortierbetrieben teilweise erheblich. Dies hängt von den geforderten Reinheiten der Endprodukte ab. Optimierungen der Anlagen erfolgen erst bei einer Abnahme der Sortierqualität, meist infolge von Änderungen in der Zusammensetzung der LVP-Sammelware. An erster Stelle der LVP-Sortierung steht die Konditionierung des Materials. Diese Stufe umfasst die gezielte Aufgabe des Materials in einen Sacköffner unter Verwendung von Radladern. Der Radladerfahrer sieht als Erster im Betrieb die Zusammensetzung des Materials und muss ggf. durch Mischen des Materials einen anlagenverträglichen Input generieren. Ebenfalls detektiert und entfernt er große Störstoffe, die nachgeschaltete Apparate wie den mechanischen Sacköffner beschädigen können und zum Anlagenstillstand führen. Anschließend erfolgt eine Siebklassierung und Windsichtung. Wenn die großen, flächigen Materialien von dem Stückgut getrennt sind, separieren Magnetabscheider ferromagnetische Komponenten wie bspw. Weißblechdosen aus dem Produktstrom. Nichtmagnetische Metalle werden über Wirbelstromscheider oder durch Handklaubung aus dem Produktstrom entfernt. Das Kernstück einer modernen LVP-Sortieranlage ist die Nahinfrarot-Sortierung. Über die unterscheidbare Wärmestrahlung von verschiedenen Materialien kann eine Sortierung in einzelne Produktgruppen, vgl. Abb. 8, generiert werden.

³⁶ Vgl. Kapitel 3 Ausgangssituation und Praxisbeispiele sowie Darstellung von Defiziten.

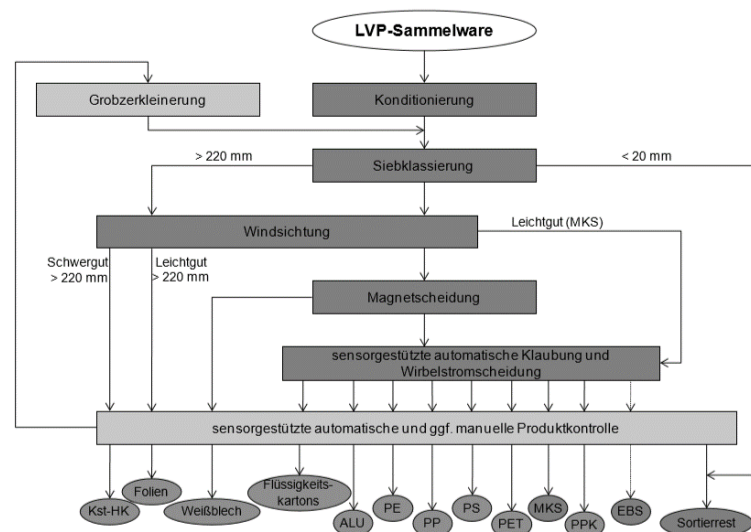


Abb. 8: Schema LVP-Sortierung Stand der Technik 2012.

Quelle: Umweltbundesamt, (Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe, 2012), S. 13.

Dies setzt voraus, dass die Materialien vereinzelt auf einem Band liegen und nicht von anderen überdeckt werden. Schwarze Kunststoffe können mit Hilfe einer Technologiekombination aus Mittel-Infrarot-Spektroskopie und Hyperspectral-Imaging mit Reinheiten von über 95 % für einen typischen Kunststoffmix sortiert werden.³⁷ Am Ende der einzelnen Produktbänder ist die manuelle Produktkontrolle durch Menschen derzeit noch unerlässlich. Gerade beim Betreiben der Anlagen über den Auslegungspunkt arbeiten die eingesetzten Sortier- und Klassierstufen an den oberen Leistungsgrenzen. Fehlausträge sind nicht selten und müssen daher nachträglich korrigiert werden, um die geforderten Produktqualitäten einzuhalten. Am Ende der LVP-Sortierung werden die einzelnen Produktgruppen in Bunkern gelagert und anschließend zu transportfähigen Ballen gepresst. Wenn eine Qualitätskontrolle angewendet wird, die aktuell für den Sortierer nicht zwingend vorgeschrieben ist, werden die Proben in der Regel vom Zuführband der Ballenpresse entnommen.³⁸ Dabei stellte Rasemann fest, dass bei hohen Qualitätsansprüchen maßgeschneiderte Probenahmeanweisungen erforderlich sind. Hierbei sind die Unterschiede zwischen den Sortieranlagen in der technischen Ausrüstung begründet. Allerdings: Je mehr Probenahmeergebnisse von der Qualität der Dispositionsmenge abweichen dürfen, desto geringer werden die Unterschiede zwischen den betrachteten Sortieranlagen. Eine Musterprobeanweisung genügt lediglich für sämtliche Anlagen, wenn die Ansprüche an die Qualität der Dispositionsmenge gering sind. Liegt die Qualität des betrachteten Produktes bereits an der unteren Spezifikationsgrenze, dann ist eine hohe Genauigkeit der Probenahme erforderlich.³⁹ Darüber hinaus ist darauf zu achten,

³⁷ Vgl. Beel, H., (Sortierung von schwarzen Kunststoffen nach ihrer Polymerklasse mit Hyperspectral-Imaging-Technologie, 2017), S. 190.

³⁸ Vgl. Rasemann, W., (Handbuch Probenahme und Qualitätssicherung bei der Untersuchung und Bewertung von Stoffsystemen – Band 2, 2005), S. 772.

³⁹ Ebenda, S. 803.

dass jede Aufbereitungsanlage und das jeweilig sortierte neuartige Stoffsystem Besonderheiten innehaben, die Voruntersuchungen erfordern, um ggf. eine Übertragung von Erkenntnissen aus anderen Arbeitsergebnissen durchzuführen.⁴⁰

4.1.1 Verdichtungsvorgang in Ballenpressen

Die Verdichtung hat das verfahrenstechnische Ziel der Oberflächenverringerung und Bildung größerer Agglomerate. In der Abfallwirtschaft werden die Möglichkeiten der Pressagglomeration genutzt. Zu unterscheiden sind Verfahren mit festem Widerlager sowie Strangpressverfahren.⁴¹ In Abb. 9 ist das Schaubild einer Strangpresse dargestellt, welche die Ballen in horizontale Richtung presst und austrägt. Von oben werden die einzelnen Produkte in die Ballenpresse gegeben. Dies erfolgt über ein an die entsprechenden Produktbunker angeschlossenes Förderband. Optional kann ein Fluffer vorgeschaltet werden, der die Produkte vor dem Pressen auflockert.

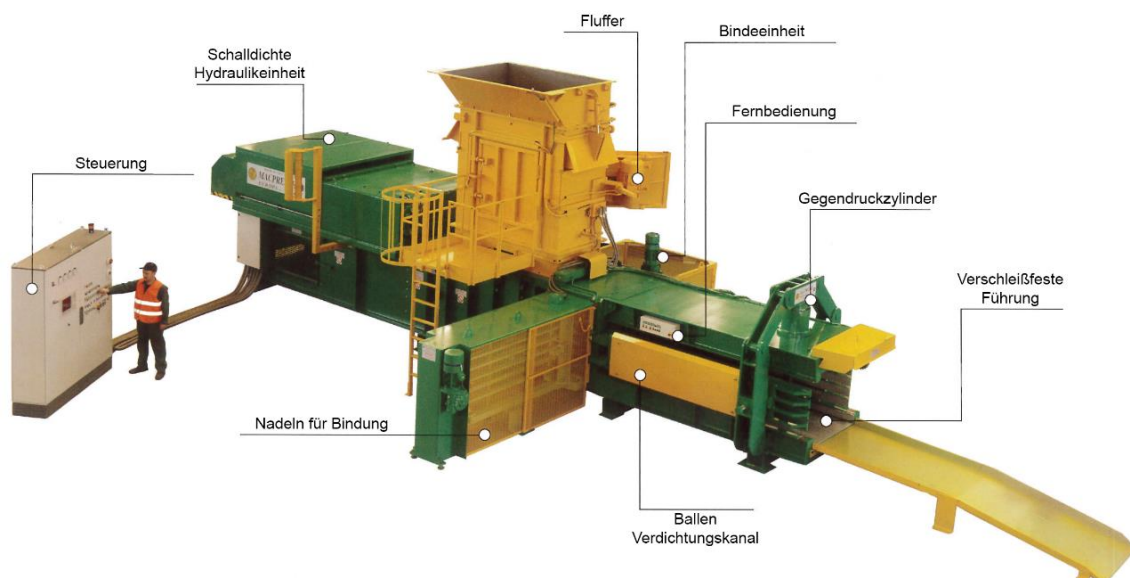


Abb. 9: Schaubild horizontale Ballenpresse.

Eigene Darstellung anhand Quelle: Macpresse Europa, (MAC 108/1, 2017), o. S.

Aufgelockerte Materialien führen infolge der Pressung zu einer Homogenisierung. Nachdem der Pressraum mit Material gefüllt ist, fährt die schalldichte Hydraulikeinheit nach vorne. Dabei erzeugt der Gegendruckzylinder den erforderlichen Gegendruck auf den letzten Ballen in der Maschine. Als Widerlager wird das vorher verdichtete Material verwendet. Wenn die vorgesehene Länge des Ballens erreicht ist, werden die Bindungen um den entsprechenden Bereich unter Verwendung von Nadeln gelegt. Der generierte Pressling befindet sich noch im Strang und wird Schritt für Schritt, mit jeder neuen Pressung, in horizontaler Richtung nach vorne ausgeschoben.

⁴⁰ Vgl. Rasemann, W., (Handbuch Probenahme und Qualitätssicherung bei der Untersuchung und Bewertung von Stoffsystemen – Band 2, 2005), S. 788.

⁴¹ Vgl. Bilitewski, B., Härdtle, G., (Abfallwirtschaft, 2013), S. 522 ff.

Bei der wirkenden Pressagglomeration mit festem Widerlager können drei Phasen unterschieden werden. In der ersten Phase steigt der Pressdruck und führt zu einer Ausrichtung der Inhaltsstoffe sowie folglich zu einer dichteren Packung. Die Energie ist als potenzielle Verformungsenergie gespeichert. Erhöht sich der Druck geringfügig, bewirkt dies eine hohe Volumenreduktion durch Verdrängung des im Gesamtvolumen enthaltenen Luftanteils. Durch den zunehmenden Pressdruck in Phase 2 erfolgt eine plastische und elastische Deformation der Inhaltsstoffe. Dadurch sind Relativbewegungen möglich und bestehende Hohlräume können mit Material gefüllt werden. Anhand des exponentiellen Wachstums des Verdichtungswiderstandes können infolge der entstehenden Reibungswärme Inhaltsstoffe mit niedrigem Schmelzpunkt an den Außengrenzen miteinander verschmelzen. Letztendlich sind in Phase 3 nahezu alle Hohlräume gefüllt, sodass ein Quasifestkörper vorliegt. Weitere Druckerhöhungen bewirken lediglich geringe Dichteerhöhungen. Die im Abfallbereich eingesetzten Strangpressverfahren sind in der Regel diskontinuierliche Kolbenstangepressen bzw. Briketierpressen. Das Pressgut wird mit einem Kolben schrittweise in einem offenen Formkanal verdichtet. Es wird ein einziger Formkanal verwendet, sodass pro Hub ein Pressling zu fördern ist.⁴²

4.1.2 Parameter und Effizienz von Ballenpressen

Hauptsächlich sind horizontale Kanalballenpressen in den Sortierbetrieben anzutreffen, um große Mengen an Inputmaterial verarbeiten und einen konstanten Produktionsfluss realisieren zu können. Verschiedene Hersteller sind im Anhang D: Ausgewählte Kanalballenpressen mit den jeweils größten Maschinenausführungen gelistet. Moderne Kanalballenpressen können die Länge des Ballens variieren. Dagegen liegt bei den untersuchten Maschinen die Breite des Ballens zwischen 1100 mm bis 1200 mm und die Höhe zwischen 720 mm bis 1200 mm. Deutliche Unterschiede sind bei der spezifischen Presskraft festzustellen. In Abb. 10 sind alle zehn betrachteten Maschinentypen in einem Netzdiagramm gegenübergestellt und die spezifische Presskraft sowie der Verdichtungsgrad aufgetragen. Als zu pressendes Material wurden PET-Hohlkörper mit einer Schüttdichte von 30 kg/m³ angenommen. Ferner sind die Dichten der produzierten Ballen unter Berücksichtigung der Herstellerangaben berechnet worden. Die spezifische Presskraft der Kanalballenpressen liegt zwischen 49 N/cm² und 203 N/cm². Für die Ballenbeprobung ist der Verdichtungsgrad wichtig, denn dieser bestimmt das Verhalten des Ballens als Quasifestkörper.

⁴² Vgl. Bilitewski, B., Härdtle, G., (Abfallwirtschaft, 2013), S. 522 ff.

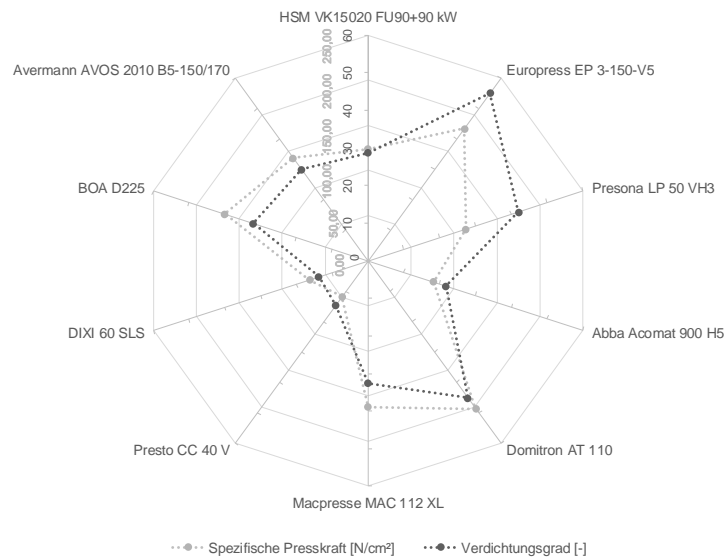


Abb. 10: Presskraft im Verhältnis zum Verdichtungsgrad von Kanalballenpressen.
Eigene Darstellung anhand Quelle: Anhang D: Ausgewählte Kanalballenpressen.

4.1.3 Anzutreffende Ballendimensionen in den Dualen Systemen

In den Jahren 2016/2017 gab es 31 unterschiedliche Fraktionen, die von den beauftragten Sortierern für den Grünen Punkt spezifikationsgerecht sortiert wurden. Datengrundlage bilden Besuche in acht Sortier- und Recyclingbetrieben. Es wurden die Abmaße und das Gewicht der Ballen aufgenommen. Die Daten zu den einzelnen Ballenfraktionen liegen im Anhang A: Daten Ballendimensionen vor und bilden sechs Monatsdurchschnittswerte ab. Allerdings sind die Angaben nicht allgemeingültig, da die Korngrößen der sortierten Fraktionen abhängig von der eingesetzten Klassier- und Sortiertechnik sind. Eigene Messungen bei ausgewählten Herstellern und Recyclern von Ballenware⁴³ haben ergeben, dass ein Ballen im Mittel, bezogen auf 59 Ballen, die Dimension (BxHxT) 1085 mm x 1026 mm x 1167 mm besitzt. Des Weiteren verfügen die Ballen über ein durchschnittliches Gewicht von rund 531 kg und eine durchschnittliche Dichte von 409 kg/m³. Es fielen keine Ballen auf, die länger als 1200 mm waren. Rückfragen bei den verantwortlichen Ballenherstellern ergaben, dass dieses Maß das Optimum hinsichtlich der Ladekapazität des LKW darstellt.

Festzustellen ist, dass die Anzahl der Bindungen bei den untersuchten Ballenfraktionen unterschiedlich ist, siehe Abb. 11. Anzutreffen sind horizontale und vertikale Bindungen. Bei stückigen Materialien, die sich nach dem Pressvorgang aus dem Verbund lösen könnten, werden Kreuzbindungen in Pressrichtung eingesetzt. Entscheidend für die Wahl der stabilisierenden Bindung ist die gepresste Fraktion. Liegt diese im Ausgangsmaterial als Folien in Korngrößen über 300 mm vor, werden einfache, vertikal oder horizontal angeordnete Bindungen verwendet.

⁴³ Vgl. Anhang E: Ballenlexikon.



Abb. 11: Unterschiedliche Bindungsarten in Pressrichtung.

Ballenfraktion: links 325 – 5x5 Bindung über Kreuz; rechts 351-2 – 5 vertikal.

Dagegen sind PE/PP Verpackungen, bspw. Dusch- und Waschmittelverpackungen, meist in kleineren Korngrößen anzutreffen. Diese Materialart wird daher mit einer Kreuzbindung, eine Kombination aus horizontalen und vertikalen Bindungen, versehen. Bei formstabiler Pressung bspw. von PET können vertikale Bindungen ausreichen. Nicht selten sind bei kleineren Korngrößen zusätzlich Folien oder Netze um den Ballen gewickelt, damit sich durch den Transport keine Materialien aus dem Verbund lösen.

4.2 Ausgewählte Probenahmemethoden als Grundlage für eine mögliche Verfahrensübertragung

Im Bereich der Entsorgungswirtschaft ist die Kenntnis über das Wert- und Gefahrenstoffpotenzial von Abfällen notwendiger Bestandteil für das wirtschaftliche Handeln des betreffenden Unternehmens. Dabei hängt das Vorgehen zur Probenahme entscheidend vom späteren Verwendungszweck des Abfallgemisches ab. Wird ein qualitativ hochwertiger Sekundärbrennstoff produziert, müssen die gesetzlichen Grenzwerte bspw. für Chlor- und Schwermetallgehalt eingehalten werden. Ist ein Recycling des Abfallgemisches geplant, sind die enthaltenen Materialien zu betrachten. Verschiedene Nutzungspfade für Abfälle haben zusammen ein Grundmerkmal: Sie liegen in großen, heterogenen Mengen bei den Entsorgern vor. Diese Grundmenge⁴⁴ kann mehrere tausend oder nur wenige Kubikmeter Abfall beinhalten. Aus der mengenmäßig stark variierenden Grundmenge soll eine repräsentative Probe genommen werden. Dabei wird die entnommene Probe immer weiter reduziert, bis am Ende des Prozesses wenige Gramm des Ausgangsmaterials in den Analysenverfahren Anwendung finden. Bereits vorhandene Probenahmewerkzeuge, die bspw. im Bereich des Bergbaus genutzt werden, sind aufgrund der nicht homogenen Stoffsysteme nur bedingt einsetzbar.

In der Literatur gibt es relativ identische Auffassungen über die Definition einer repräsentativen Probe. Pierre Gy hat diesen Begriff erstmals wissenschaftlich definiert:

⁴⁴ Ballen auf einem LKW, Container oder Schiff bzw. in einem abgegrenzten Lager mit zugehörigem Raumvolumen.

„Dies ist eine Probe, welche typisch dem Elternmaterial in der interessierenden Eigenschaft ist. Repräsentativität ist charakterisiert durch die Abwesenheit systematischer Fehler und eine akzeptable Varianz.“⁴⁵

Francis F. Pitard fasste Gys Definition mit der Aussage „Repräsentativ ist, wenn eine geforderte Genauigkeit eingehalten wird“⁴⁶ zusammen.

Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall stellte in der LAGA PN 98 hinsichtlich der Repräsentativität einer Probe fest:

„Probe, deren Eigenschaften weitestgehend den Durchschnittseigenschaften der Grundmenge des Prüfgutes entsprechen.“⁴⁷

Neben statistischen Grundlagen werden vereinfachend Kenntnisse über Korngröße, Korngewicht etc. hinsichtlich der Grundmenge und der beinhaltenden Teilchenchargen für den Nachweis genutzt.⁴⁸ Das Fundament statistisch begründeter Probenahmen sind Probenahmemodelle, in denen bspw. eine Vorgabe zur geforderten Genauigkeit⁴⁹ gegeben wird. Diese Angaben können in Relation zur Anzahl der entnommenen Proben, der Probenmenge sowie der Heterogenität ausgewiesen sein.⁵⁰ Demnach sei eine Probe repräsentativ, wenn die geforderte Genauigkeit eingehalten wird. Dies kann erst nach der Analyse der Probe bewertet werden. Dagegen ist eine Probenahme repräsentativ, wenn die Probenahmestreuung keinen signifikanten Einfluss hat. Eine repräsentative Probenahme ist quasi unabhängig von der Analysenstreuung.

Die im weiteren Verlauf des Kapitels erörterten Methoden zeigen eine Auswahl an möglichen Probenahmemethoden für den betrachteten Bereich der Leichtverpackungsabfälle. Auf eine vollumfängliche Diskussion aller Methoden wurde verzichtet und stattdessen auf die von Mitarbeitern der Sortier- und Recyclingbetriebe sowie Analysenlabore empfohlenen Methoden eingegangen.

⁴⁵ Übersetzung auf Grundlage: Gy, P., (Sampling for Analytical Purposes, 1999), o. S.

⁴⁶ Übersetzung auf Grundlage: Pitard, F., (Pierre Gy's sampling theory and sampling practice, 1993), S. 37.

⁴⁷ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, (LAGA PN 98, 2004), S. 7.

⁴⁸ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, (LAGA PN 98, 2004), S. 54.

⁴⁹ Genauigkeit = Präzision + Richtigkeit.

⁵⁰ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, (LAGA PN 98, 2004), S. 54.

4.2.1 Bohrkern-Probenahmetheorie nach Pierre Gy und Francis P. Pitard

Mit der repräsentativen Probenahme aus ein-, zwei- und dreidimensionalen Probekörpern haben sich Pierre Gy⁵¹ und Francis P. Pitard beschäftigt. Zur Beprobung des Erdreichs gibt es verschiedene Arten von Probenehmern (A), Bohrern (B) und Stechlanzen (C), siehe Abb. 12.

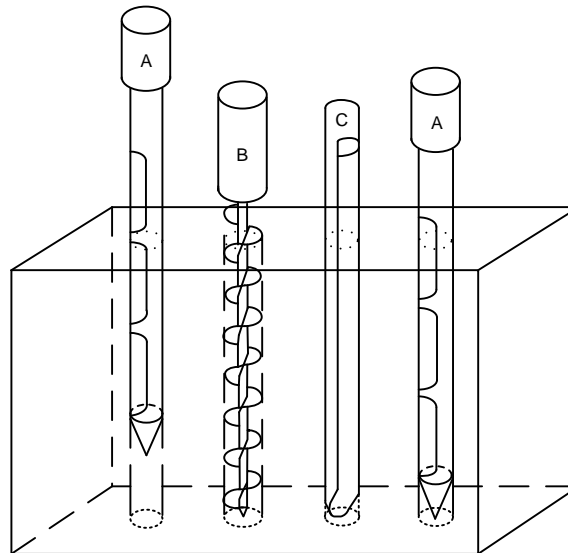


Abb. 12: Bohrer und Stechlanzen, die Begrenzungsfehler produzieren.

Eigene Darstellung anhand Quelle: Pitard, F., (Pierre Gy's sampling theory and sampling practice - Volume II, 2000), S. 36.

Diese Werkzeuge generieren zwar einen perfekt zylindrischen Bohrkern in weichen und störstofffreien Böden, können allerdings Säcke oder andere Gebinde nicht vollständig bis zum Boden beproben. Der Grund dafür ist die konische Ausführung des Kopfes. Die gezogenen Proben sind dadurch unvollständig und beinhalten einen systematischen Fehler. Ideal ist eine vollständig zylindrische Probe, welche die gesamte Mächtigkeit des Probenahmekörpers erfassen kann. Gy und Pitard betrachten Kernbohrer, welche einen klar definierten, zylindrischen Bohrkern über die gesamte Länge erzeugen können.

In Abb. 13 ist ein Entwurf für eine Diamant-Kernbohrkrone dargestellt. Die wulstige Ausführung dient zur besseren Abführung des Bohrgutes unter Einsatz von Wasser. Der Bohrkern wird mittels diamantbesetzter Schneiden aus dem Boden geschnitten. Dabei ist der innere Schneidenradius kleiner als das Bohrkern-Führungsrohr.

⁵¹ Vgl. Gy, P., (Sampling for Analytical Purposes, 1999), o. S.

Vgl. Gy, P., (Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems, 1992), o. S.

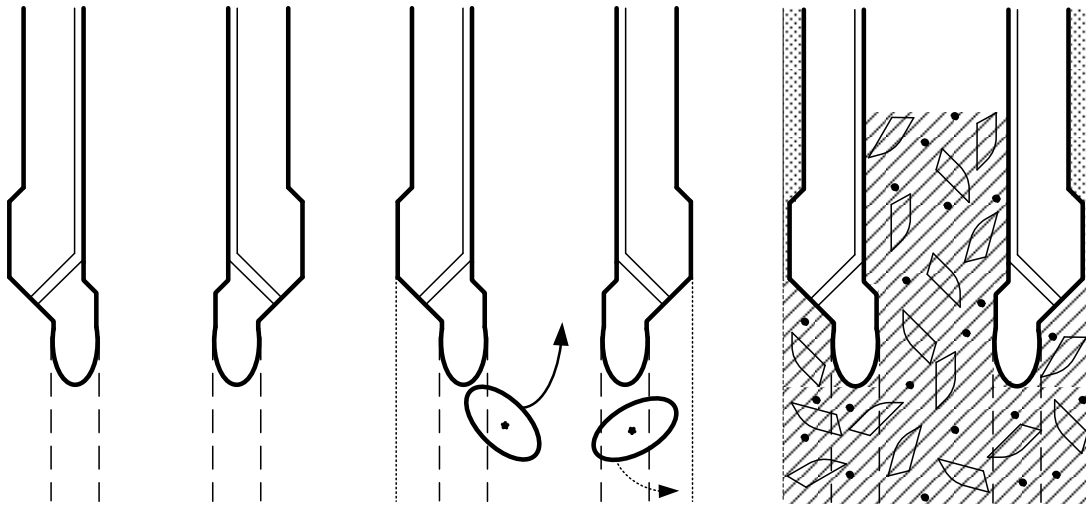


Abb. 13: Entwurf für eine Diamant-Kernbohrkrone.

Eigene Darstellung anhand Quelle: Vgl. Pitard, F., (Pierre Gy's sampling theory and sampling practice - Volume II, 2000), S. 32 f.

Dieser Bohrer ermöglicht einen klaren und dünnen Schnitt zwischen dem Bohrkern und den nicht zugehörigen Bereichen.⁵² Außerdem ist der Bohrkern im Inneren des Rohres gesichert, bevor der Kernbohrer das Bohrloch auf das Endmaß erweitert. Beide Eigenschaften sorgen dafür, dass nur die Bereiche des Bodens in den Bohrkern gelangen, die für diesen vorgesehen sind. Allerdings ist die Konstruktion durch den schmalen Schneidendurchmesser empfindlich gegenüber Scherkräften und neigt daher zum Brechen.⁵³ Wird Boden bestehend aus Schlamm, Sand oder Lehm beprobt, können Steine/Partikel nicht sauber vom Bohrer zerschnitten werden. Dies liegt an der umgebenden Matrix, die dem auftreffenden Druck nicht standhalten kann. Im ungünstigsten Fall wird der Stein/das Partikel als Ganzes in den Bohrkern hinein- oder hinausgedrückt.⁵⁴ Die Probe ist nicht mehr als repräsentativ anzusehen. Kleinere Körper mit dem Schwerpunkt innerhalb des Einzugsradius des Bohrkerns werden tendenziell in den Bohrkern transportiert, während Körper mit dem Schwerpunkt im Schnittbereich vom Bohrkern weg transportiert werden.

⁵² Vgl. Pitard, F., (Pierre Gy's sampling theory and sampling practice - Volume II, 2000), S. 31.

⁵³ Ebenda, S. 31.

⁵⁴ Ebenda, S. 98 ff.

4.2.2 Anwendung der Richtlinie LAGA PN 98

Zur Probenahme von festen Abfällen und abgelagerten Materialien bietet die LAGA PN 98 eine Handlungsanweisung. Laut dieser können Proben aus frei lagernden Haufwerken/Mieten/Schüttungen, Behältern, Transportfahrzeugen oder Abfallströmen⁵⁵ genommen werden. Konkrete Hilfestellungen zur Beprobung von ballierten Abfällen werden nicht gegeben. Lediglich die Mindestanzahl der herzustellenden Mischproben für Gebinde, Big Bag, Fässer und Trommeln wird ausgewiesen.⁵⁶ Für 30 m³ sind acht Einzelproben⁵⁷ und zwei Mischproben/Laborproben angesetzt.⁵⁸ Laut Teil 1 der LAGA PN 98 sind alle m Laborproben zu untersuchen. Der neue Teil 2 reduziert diesen Vorgang auf zwei unabhängige Mischproben. Die LAGA PN 98, welche als behördliche Richtlinie für die Beprobung von Abfallstoffen aus privaten und gewerblichen Abfällen als Regelwerk dient, sowie in der Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung) vorgeschrieben ist, findet in Bezug auf die Sortierung von Abfallstoffen mit einer Korngröße von > 120 mm keine Anwendung und verweist auf die Sächsische Abfallverordnung.⁵⁹ Für eine Laborprobe aus Stoffen mit „großer Stückigkeit“ gibt die LAGA PN 98 ein Behältnis mit einer Mindestgröße von zehn Litern an.⁶⁰

4.2.3 Vorgehen nach Beiblatt 08/2014 des Grünen Punktes - Sortieranalyse

Der Fokus bei der Analyse der Ballenfraktionen liegt auf der Sortieranalyse eines augenscheinlich repräsentativen Ballens. Aus diesem wird eine Probe mit einem Gewicht von 80 kg bis 100 kg entnommen und entsprechend der gültigen Produktspezifikationen nach fraktionsgerechtem Anteil und den jeweils aufgeführten Störstoffen sortiert.⁶¹ Im Grünen Punkt Beiblatt 08/2014 heißt es: „Die Reinheit der Sortierfraktion wird durch Probenahme in Anlehnung an LAGA PN 98 (Stand: Dezember 2010) und anschließender Analyse (z. B. Handsortierung und Verwiegung oder chemische Analyse) bestimmt.“⁶² Der Ballen muss aufgeschnitten werden, sodass anschließend ein Haufwerk vorliegt. Zwar wird eine Probenahme in Anlehnung an die LAGA PN 98 empfohlen, allerdings liegen die im Ballen beinhaltenen Korngrößen deutlich über dem angegebenen Maximum von 120 mm. Dies erschwert die Herstellung einer Misch-/Sammelprobe, da bei Korngrößen über 120 mm ein fraktioniertes Schaufeln, eine Verjüngung durch Aufkegeln und Vierteln mittels Probenkreuz oder das Teilen mittels Schürfschlitz, Probenstecher, Riffelteiler oder Rotationsteiler in den seltensten Fällen möglich ist.

⁵⁵ Bewegt, frei fallend oder ruhend.

⁵⁶ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA, (LAGA PN 98, 2004), S. 36.

⁵⁷ Im weiteren Verlauf der Dissertation wird der Begriff Einzelprobe gleichbedeutend mit dem Begriff Volumenelement verwendet.

⁵⁸ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA, (LAGA PN 98, 2004), S. 18.

⁵⁹ Ebenda, S. 20.

Vgl. INTECUS GmbH, (Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen, 2015), S. 19.

⁶⁰ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA, (LAGA PN 98, 2004), S. 20.

⁶¹ Vgl. Der Grüne Punkt, (Qualitätsprüfungsschema, 2016), S. 1.

⁶² Der Grüne Punkt, (Beiblatt 2016, 2016), S. 1.

4.2.4 Annahmestichprobenverfahren anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten - DIN ISO 18414:2012-02

Mit diesem Probeverfahren wird ein System von Einfachprobenplänen für die Attributprüfung einer Serie von Losen festgelegt. Die Probenanweisungen des betrachteten Systems besitzen die Annahmezahl null, was bedeutet, dass kein Los mit einer oder mehreren fehlerhaften Einheiten angenommen wird. Für die Berechnung wird u. a. der maximale Durchschlupf, den der Anwender selbst wählt, festgelegt. Durch die Ausübung eines wirtschaftlichen und psychologischen Druckes bei einer Nichtannahme der Lieferung auf den Lieferanten soll ein für den Käufer der Ware fehlerfreier Prozess aufrechterhalten werden. Der langfristige Prozentsatz aller fehlerhaften, an den Kunden gelieferten Einheiten soll dabei den maximalen Durchschlupf nicht überschreiten. Ist die Qualitätsentwicklung positiv, kann als Reaktion darauf der Probenumfang reduziert werden. Verwendbar ist diese internationale Norm, wenn die angelieferte Ware identisch ist, vom gleichen Hersteller stammt und aus einem einzigen Produktionsprozess entspringt. Ferner muss mindestens ein Qualitätsmerkmal betrachtet werden, das eindeutig als fehlerfrei oder fehlerhaft bewertbar ist. Der mit der Beurteilung des Qualitätsmerkmals eines Produktes verbundene Prüffehler muss außerdem vernachlässigbar und die Prüfung nicht-zerstörend sein.⁶³

Der Probenumfang (n_P) wird unter Berücksichtigung des maximalen Durchschlupfs (a_{MD}), des angesammelten Vertrauens (K) und des Losumfangs (N) bestimmt:

$$n_P = \frac{N}{(K + N) * a_{MD} + 1} \quad \text{Gl. 4-1}$$

Dem Los, hier der LKW-Ladung, ist eine Zufallsprobe vom Umfang N zu entnehmen. Die für die Einheit definierten Qualitätsmerkmale sind zu überprüfen. Sollte keine der kontrollierten Einheiten außerhalb der Spezifikation liegen, ist das Los anzunehmen und das Vertrauen K zu erhöhen. Liegen Einheiten außerhalb der Spezifikation, wird das Los abgewiesen.⁶⁴

Ist die Entscheidung auf Nichtannahme des Loses gefallen, ist bei aktuellem Vertrauen von $K = 0$ eine 100 % Prüfung des Loses durchzuführen. Alle fehlerfreien Einheiten sind anzunehmen. Das Vertrauen bleibt weiter bei null. Ist das aktuelle Vertrauen nicht null, ist eine 100 % Prüfung zwischen Lieferanten und Kunden zu klären. Gegebenenfalls wird die Lieferung verschrottet oder an den Lieferanten zurückgesendet. Infolgedessen wird das Vertrauen auf null gesetzt.⁶⁵ Im Anhang A der DIN ISO 18414:2012-02 ist eine Beispieltabelle (Tabelle A.2)⁶⁶ hinterlegt. Dort wird eine Reduzierung des Probenumfangs bei einem maximalen Durchschlupf von 1 % beschrieben.

⁶³ Vgl. DIN ISO 18414:2012-02, S. 6.

⁶⁴ Ebenda, S. 14.

⁶⁵ Ebenda, S. 16.

⁶⁶ Ebenda, S. 22.

4.2.5 Anleitung für die Entnahme von Proben zur integralen Charakterisierung von Haufwerken – DIN 19698-2:2016-12

Anhand der Anleitung für die Entnahme von Proben zur integralen Charakterisierung von Haufwerken, im weiteren Verlauf integrale Charakterisierung genannt, können Proben gewonnen werden, welche die Durchschnittseigenschaften der Grundmenge repräsentativ charakterisieren. Die Norm behandelt u. a. die auf statistischen Grundlagen gegründete Herangehensweisen zur Probenahme von Feststoffen aus Haufwerken zur Bestimmung des repräsentativen Mittelwertes. Voraussetzung ist, dass die Durchschnittseigenschaften der Grundmenge interessieren. Eine räumliche Verteilung eines Merkmals in der Grundmenge kann damit nicht ermittelt werden. Anwendung findet diese bei vorseparierten Haufwerken, über die bereits Informationen wie gleiche Herkunft oder Körnungsverteilung vorliegen. Adressiert ist die Norm für mineralische Feststoffe wie bspw. Erdaushub, aufbereitete Bodenmaterialien, etc.⁶⁷ Unterschieden wird in die Probenherstellung im Feld und im Labor. Aus Einzelproben werden unabhängige Mischproben erzeugt. Dabei können die Einzelproben vorher zu Mischproben zusammengefasst werden. Aus jeder Mischprobe entsteht anschließend eine Laborprobe, aus denen wiederum Proben zur Analysenprobe gewonnen werden können. Die Mindestanzahl von Laborproben kann entweder berechnet werden oder entsprechend festgelegt sein. Es werden immer mindestens zwei Mischproben untersucht. Unter Zuhilfenahme der integralen Charakterisierung kann die Mindestanzahl der benötigten Einzel- und Laborproben für bekannte und unbekannte Streuungen berechnet werden. Dabei sind mindestens zwei Laborproben mit jeweils vier Einzelproben zu generieren. Die analytische Unsicherheit muss kleiner sein als die festzulegende tolerierbare Unsicherheit. Angenommen wird, dass sich die Variabilität der Grundmenge in Abhängigkeit vom Volumen erhöht.⁶⁸

⁶⁷ Vgl. DIN 19698-2:2016-12, S. 5.

⁶⁸ Ebenda, S. 11.

4.2.6 Entstehung der Pressbohrmethode und resultierende Norm DIN 54385:2016-08

Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes Sekundärrohstoffe und Recyclingtechnik an der HSN wurde eine neue Methode hinsichtlich der Probenahme und Gewinnung von Analysenproben aus heterogenen Schüttgütern mit geringer Dichte entwickelt.⁶⁹

In Abb. 14 ist das Grundschaema der Pressbohrmethode (PBM) erläutert. Die Grundidee der PBM basiert auf den Arbeiten von Gy und Pitard. Eine Entnahme von Analysenproben erfolgt durch wahrscheinlichkeits-proportionale Beprobung über Bohrlöcher aus einem zylindrischen formstabilen Quasifestkörper. Die Pressflüssigkeit tritt beim Verdichten der Probe aus Entwässerungsöffnungen heraus und kann für eine nachfolgende Chloranalyse (Chlor anorganisch) aufgefangen und genutzt werden. Eine Probenahme aus dem Quasifestkörper wird mittels eines Spiralbohrers durchgeführt. Dabei erfolgt die Entnahme der Volumenelemente über ein Zufallssystem, welches die Bohrlochhöhe, die Bohrlochnummer (Winkel) und die Bohrtiefe ermittelt.

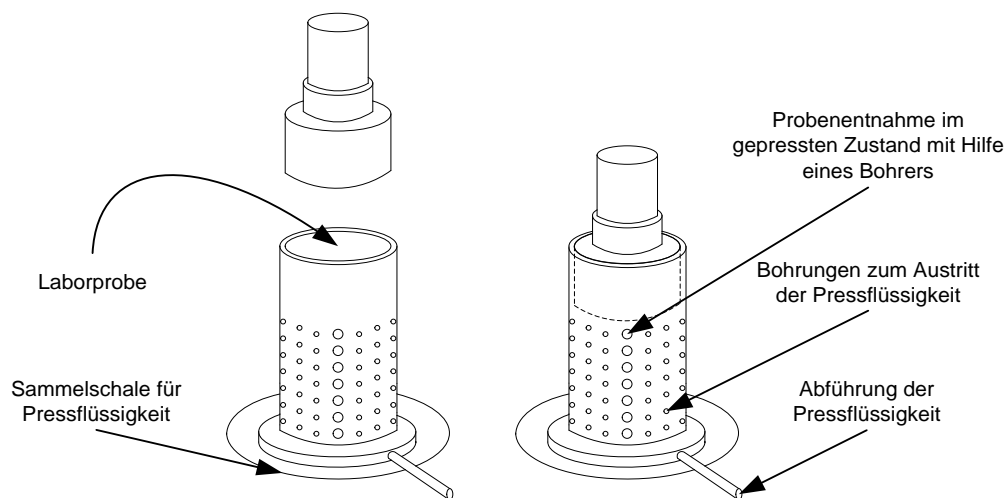


Abb. 14: Grundschaema der Pressbohrmethode.

Der Nachweis über die Funktionalität wurde im Zeitraum vom 01.07.2007 bis 31.12.2008 erbracht und die Methode im August 2016 als DIN-Norm bestätigt. Per Pressbohrmethode soll die Gewinnung repräsentativer Analysenproben aus heterogenen Stoffen geringer Schüttdichte vereinfacht werden. Auf Grundlage eines Patentes, einer Dissertationsschrift sowie Bachelor-/Masterarbeiten wurde diese Norm erstellt und befindet sich seit April 2015 im Normungsgremium der CEN/ISO. Der Anwendungsbereich gilt für - verdichtbare - feste Ersatzbrennstoffe, Sekundärbrennstoffe, Biobrennstoffe, Leichtverpackungen, Schredderleichtfraktionen, heizwertreiche Fraktionen, biologisch behandelte Abfälle, Deponate, Papier, Pappe, Kunststoffe sowie in Gänze für feste Stoffe geringer Schüttdichte.⁷⁰

⁶⁹ Vgl. Döring, S., (Qualifizierung der Pressbohrmethode zur Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen, 2011), o. S.

⁷⁰ Vgl. DIN 54385:2016-08, S. 5.

5 Verfahrensentwicklung Ballenbeprobung mit zufallsgenerierten Entnahmekoordinaten

Bei dem hier erstmals umfänglich beschriebenen Verfahren der Ballenbeprobung wird keine Probe aus einem Haufwerk entnommen. Der Ballen bleibt in seinen Dimensionen erhalten und liegt nicht volumenvergrößert vor. Ziel ist die Herstellung einer repräsentativen Laborprobe im Sortier-/Recyclingbetrieb. Zur Herstellung einer Analysenprobe wird die Anwendung der Pressbohrmethode nach DIN 54385:2016-08, welche eine Laborprobe mit einem Volumen von 10 L fordert, favorisiert.

Der Fokus der Ballenbeprobung liegt auf der zufälligen, volumenbasierten Entnahme einer Laborprobe aus einem Ballen. Da in den Sortier- und Recyclingbetrieben eine massenbasierte Sortieranalyse stattfindet, wird das Verfahren der Ballenbeprobung im weiteren Verlauf auf bereits bestehende Probenahmemethoden beispielhaft übertragen.

Voraussetzung für eine repräsentative Probe ist eine korrekte Probenahme. Diese beginnt bereits bei der Auswahl eines Ballens aus einer Grundmenge. Anhand statistischer oder vertraglicher Festlegungen wird die zu beprobende Ballenanzahl bestimmt. Anschließend sind Laborproben zu entnehmen, die eine festzulegende Zahl an Einzelproben, im Kontext der Ballenbeprobung Volumenelemente genannt, enthalten. Jedes Volumenelement wird mittels Bohrkernbohrer zufällig aus dem Ballen entnommen.⁷¹ Das Zufallssystem gibt die Koordinaten des Volumenelements in x-, y- und z-Richtung an. Zur Entnahme können verschiedene Entnahmearten angewendet werden. Des Weiteren ist entsprechend dem zu beprobenden Material ein Bohrer auszuwählen. Dies beinhaltet die Entnahme eines, auf den Probenumfang angepassten Volumens. Stand der Technik ist die Angabe des Gewichtes auf der Karte, die jedem Ballen angehängen wird. Dieser Parameter ist für die Handhabung in der Logistik und in der Buchhaltung wichtig. Alle im weiteren Verlauf betrachteten Methoden haben das Ziel, über ein Zufallssystem die vorherrschende willkürliche Beprobung auszuschließen.

⁷¹ Vgl. Bilder Anhang T.1: Volumenelemente und Patties.

5.1 Zufallsgenerierte Koordinaten im Ballen

Das im Ballen vorliegende Raumsystem ist in Abb. 15 beschrieben. Der Koordinatenursprung befindet sich, ausgehend von der Pressrichtung, in der linken unteren Ecke des Ballens. Die Breite wird mit x , die Höhe mit y und die Tiefe mit z bezeichnet. Da das vorliegende Raumsystem einen Quasifestkörper darstellt, kann dieser nach dem Aufmaß bewegt werden, ohne dass sich die Maße durch Verformung des Ballens verändern.

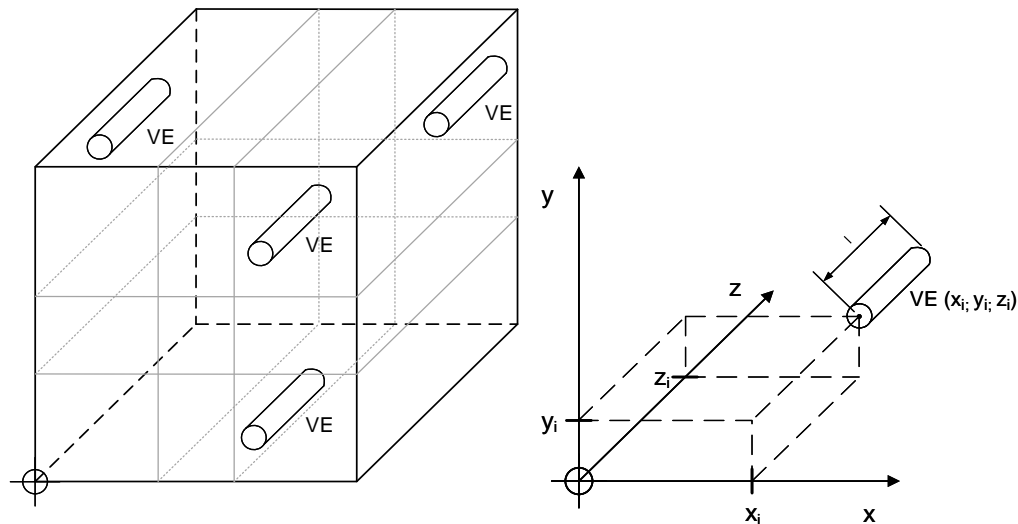


Abb. 15: Volumenelemente und Koordinaten im Ballen.

Ein zylinderförmiges Volumenelement (VE) besteht aus drei Grundkoordinaten x_i , y_i und z_i . Der Koordinatenursprung ist am Anfang des VE, in der Mitte des Kreisringes angeordnet. Hierbei legt l die Länge des zu erfassenden VE und damit die Endkoordinate fest, siehe Gl. 5-1.

$$VE_i(x_i; y_i; z_i; l) \text{ für } VE_1 \dots VE_n$$

Gl. 5-1

Durch einen Zufallsgenerator sind die Werte für die Koordinaten x_i , y_i und z_i zu bestimmen. Sollte der Ballen beidseitig beprobt werden, weil die Bohrerlänge nicht der Tiefe des Ballens entspricht, ist

- eine Berechnung der Bohrkoordinaten für beide Seiten oder
- die Transformation der erzeugten Koordinaten auf die Rückseite notwendig.

Hierbei ist die Variante a) zu bevorzugen, da die Bindungen auf der Rückseite ungleich der Vorderseite angeordnet sein können.

Im Gegensatz zur Würfelteilungsmethode nach Zwisele⁷² ist die Zufallsauswahl der gleichgroßen Volumenelemente bei der Ballenbeprobung nicht systematisch geschichtet.⁷³ Anwendung findet hier die reine bzw. uneingeschränkte Zufallsauswahl.⁷⁴ Diese ergibt sich aus dem dreidimensionalen Koordinatensystem. Das heißt, es ist kein starres

⁷² Vgl. Zwisele, B., (Entwicklung einer neuen Probenahmemethode für heterogene Abfälle geringer Schüttdichte, 2004), S. 128.

⁷³ Ebenda, S. 54-55.

⁷⁴ Ebenda, S. 51.

Raster zur Auswahl der Koordinatenpunkte festgelegt.⁷⁵ Theoretisch kann jeder Punkt des Ballens, innerhalb seiner bohrphysikalischen Grenzen, zufällig ausgewählt und beprobt werden. Hierbei sind die zu entnehmenden Teilmengen aus der Grundmenge durch Benutzung eines Bohrers gleich groß. Somit ist die Wahrscheinlichkeit, dass die enthaltenen Elemente in die Probe gelangen, ebenfalls gleich groß und lediglich von der Stichprobenanzahl abhängig. Eine hohe Stichprobenanzahl erhöht die Sicherheit der Werte. Für die Generierung der zufälligen x-, y- und z-Koordinaten kann ein Tabellenkalkulationsprogramm wie Microsoft Excel verwendet werden.

Eine grundlegende Definition für den Begriff „Quasifestkörper“ ist in der Literatur nicht angeführt. Eine Übersetzung in „Beinahe-Festkörper“ trifft die Eigenschaften unzureichend. Die folgende Definition dient der erstmaligen, objektiven Beschreibung eines Quasifestkörpers: „Als Quasifestkörper wird ein dreidimensionales Objekt bezeichnet, das Stoffe beinhaltet, welche nicht miteinander verbunden sind, aber einen festen Zusammenschluss aufweisen. Dabei können die Objekte homo- oder heterogene Charakteristika in ihren Stoffeigenschaften oder Korngrößen besitzen. Die dreidimensionale Struktur erhält das Objekt durch eine oder mehrere äußere Einwirkungen, wie bspw. Druck, Temperatur oder/und Fixierung mit strukturerhaltenden Materialien. Das Verhalten des dreidimensionalen Objektes entspricht in etwa dem eines massiven Körpers. Wird der feste Zusammenschluss aufgehoben, können die Inhaltsstoffe mit geringem Kraftaufwand entnommen werden.“

Liegt die Verdichtung bei \geq zwei, kann der vorliegende Materialkörper ein Quasifestkörper sein.

$$\text{Verdichtungsgrad} = \frac{\text{Dichte Materialkörper}}{\text{Schüttdichte}} \geq 2 \quad \text{Gl. 5-2}$$

Ist zudem eine stabile Fixierung erkennbar und bei Bewegung des Körpers keine bleibende Verformung zu sehen, ist von einem Quasifestkörper auszugehen.

⁷⁵ Mit Ausnahme der Ballenauswahl von einem LKW oder aus einem Ballenlager.

5.2 Verfahren zur repräsentativen Ballenauswahl für eine vorgegebene Grundmenge

Ballenware wird innerhalb der bekannten Logistikketten umgeschlagen und gelagert. Dabei ist eine willkürliche Auswahl des Ballens aus einer Grundmenge, die mehrere tausend Kubikmeter Material umfassen kann, zu vermeiden. Üblich ist die Wahl der Ballen, die gut mit Gabelstaplern erreichbar sind. Werden lediglich die Ballen untersucht, die von außen auffällig sind, kann die Lieferung insgesamt als eher nicht spezifikationsgerecht bewertet werden, vice versa. Unter Anwendung einer zufallsorientierten Auswahl der Ballen wird eine willkürliche Beprobung eliminiert. Auf die Anzahl der zu beprobenden Ballen wird in Kapitel 5.6.1 eingegangen.

5.2.1 Zufällige Ballenauswahl in einem LKW, Container oder Schiff

In LKW, Containern und Schiffen sind Ballen neben- und übereinander angeordnet. Für eine Zufallsauswahl muss dementsprechend ein Raster angelegt werden. Dieses besteht aus den dreidimensionalen Koordinaten x, y und z, angelehnt an das Koordinatensystem des einzelnen Ballens. Wie bei einer Excel-Tabelle kann die Ladung eines LKW als Zeilen- und Spaltensystem gesehen werden. Die Breite ist mit x und die Höhe mit y gekennzeichnet. Des Weiteren ist die Tiefe der Ladung mit z bezeichnet, wie in Abb. 16 in der Seitenansicht und Draufsicht einer 20 Ballen umfassenden LKW-Ladung dargestellt.

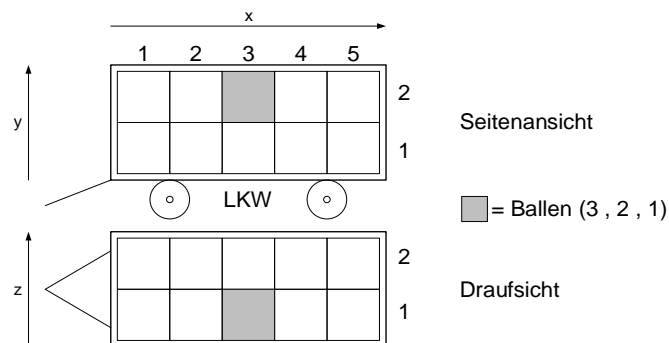


Abb. 16: Register für zufällige Ballenauswahl in einem LKW.

Das Raster ist für alle Transportplattformen geeignet und flexibel erweiterbar. Im Produktions- und Anlieferungsprozess sind die Dimensionen der Ladung ähnlich, sodass übersichtliche Grafiken für die Probennehmer gestaltet werden können. Zu jeder Anlieferung kann ein Dokument mit Probenahmeplan erstellt werden. Das Probenahmepersonal kann exakt die Ballen entnehmen, die zufällig vom System ausgewählt wurden. Der zu entnehmende Ballen hat die Koordinaten „Ballen (3, 2, 1)“. Die willkürliche Beprobung ist ausgeschlossen, da anhand der Zufallsauswahl eine klare Anweisung und Handlungsstrategie vorliegt.

5.3 Verfahren zur Vorbereitung der Probenahme aus Ballen

Während der Ballenherstellung können entstehende Ballen vereinzelt nicht ideal als Quader gepresst werden. Zudem treten durch die Inhomogenitäten des Materials Schwankungen im Gewicht oder in der Größe des Ballens auf. Außerdem können die Bindungen, infolge einer fehlerhaften Verpressung oder eines Transportes des Ballens, in einer nicht parallel zueinander verlaufenden Position angeordnet sein. Eine abweichende Ausrichtung konnte während der Arbeiten zur Charakterisierung und Klassierung festgestellt werden.⁷⁷ Die abgelichteten Ballen für das im Anhang E liegende Ballenlexikon zeigen schiefe Bindungen. Auf Nachfrage bei den Produktionsverantwortlichen und den ausgewählten Herstellern von Ballenpressen hieß es, dass die Drähte bei einer funktionstüchtigen Bindungseinheit in der Ballenpresse innerhalb des geringen Toleranzbandes nahezu parallel geführt werden. Dennoch sind nicht parallele Bindungen anzutreffen, was auf einen unsachgemäßen Transport des Ballens oder eine nicht einwandfreie Verdichtung des Materials zurückzuführen ist. Bei der Produktspezifikation 322 – Kunststoff Hohlkörper – werden durch die große Korngröße und Stabilität der Materialien die Drähte aus der ursprünglich vorgesehenen Position gedrückt. Ferner sind bei den Produktspezifikationen 321, 324-1, 325 und 329 beschädigte Stahldrähte zu erkennen, die auf den Transport des Ballens bzw. Materialschwächen in den Bindungsdrähten zurückzuführen sind.⁷⁸

Eine Probenahme kann nur in Pressrichtung des Ballens erfolgen, wobei die Randbereiche nicht beprobungsfähig sind. Es ist physisch schwierig, mit einem Bohrer die Randbereiche zu beproben. Während des Bohrprozesses kann sich kein stabiler Kanal bilden, wodurch die Gefahr des Ausreißens stark erhöht ist. Im kritischsten Fall kann der Bohrer ganz aus dem Ballen gleiten und den Maschinenaufbau beschädigen bzw. Menschen verletzen. Um dies zu vermeiden sind Randbereiche um das eigentliche Probefeld definiert.

⁷⁷ Vgl. Kapitel 4.1.

⁷⁸ Vgl. Anhang E: Ballenlexikon.

5.3.1 Festlegung der Rand- und Sicherheitsbereiche

Das Probefeld umfasst die unter physikalischen Parametern in Pressrichtung zu beprobende Fläche eines Ballens und wird vom Randbereich begrenzt. Innerhalb des Probefeldes ist die stabile Bildung von Bohrkanälen möglich. Auf der zu beprobenden Ballenfläche gibt es mehrere Bereiche, die nicht beprobt werden können, siehe Abb. 18. Diese sind der Randbereich um das Probefeld s_{Rand} , der Sicherheitsbereich um die Bindungen s_{Bindung} und der Sicherheitsbereich um die Bohrungen s_{Bohrung} . Diese Rand- und Sicherheitsbereiche besitzen unterschiedliche Abmessungen und sind nicht gleichzusetzen!

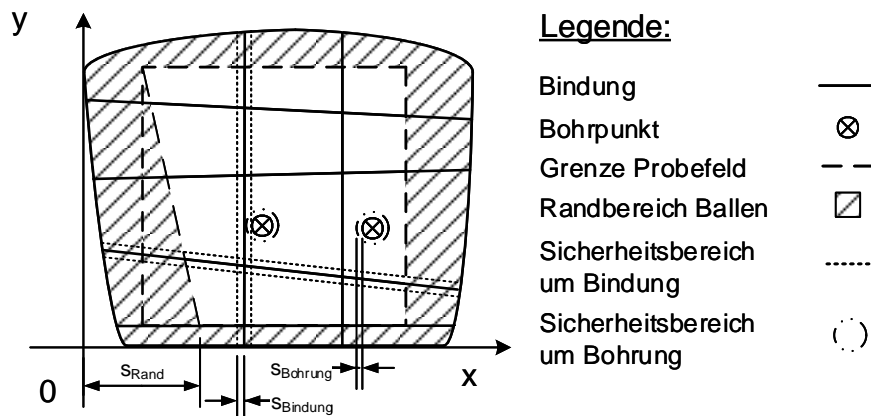


Abb. 18: Extreme Darstellung der Rand- und Sicherheitsbereiche eines Ballens.

Der Randbereich des Ballens wird von der äußeren, sichtbaren Ballenfläche in Richtung der Ballenmitte gemessen. Bei genauerer Betrachtung der Ballenoberfläche wirkt diese teilweise stark zerklüftet. Diese Oberflächeneigenschaft muss zur Berechnung des notwendigen Randbereichs berücksichtigt werden. Während Besuchen in unterschiedlichen Sortieranlagen und bei der Beprobung von ausgewählten Ballen an der Hochschule Nordhausen wurde festgestellt, dass die maximalen Vertiefungen in einem ordnungsgemäß gepressten Ballen selten größer als 100 mm sind. Sollten deutlich größere Vertiefungen in dem Ballen auftreten, ist der Randbereich entsprechend zu vergrößern. Die Sicherheitsbereiche um die Bindung und den Bohrpunkt umfassen den jeweiligen Nahbereich. Bindungen dürfen während der Probenahme nicht zerstört werden. Der Sicherheitsbereich verläuft parallel auf beiden Seiten neben der Bindung, in horizontaler oder vertikaler Richtung. Je nach Bindungsart kann der Sicherheitsbereich verringert werden, um nutzbare Beprobungsfläche zu gewinnen. Hierbei ist der Aspekt der Sicherheit gegen den der maximalen Beprobungsfläche abzuwägen.

In der Abb. 18 wird das Grundproblem der Rand- und Sicherheitsbereiche deutlich. Werden diese zu groß gewählt, können weniger Bohrpunkte auf die Ballenoberfläche gesetzt werden. Verfügt die zu beprobende Seite zusätzlich noch über eine Kreuzbindung, wird das zufällige Setzen von Bohrkoordinaten praktisch unmöglich. Versuche haben folgende Minimalwerte für stabile Bohrkanäle in den oben beschriebenen Bereichen ergeben:

$$s_{\text{Rand}} = 100 \text{ mm}; s_{\text{Bindung}} = 10 \text{ mm}; s_{\text{Bohrung}} = 10 \text{ mm}$$

Gl. 5-3

5.3.2 System zur Generierung der Bohrpunkte

Durch das Legen des Koordinatenursprungs sowie der Randmarker x_{\max} und y_{\max} auf die Grenzen des Probefeldes, wie in Abb. 19 dargestellt, muss der Randbereich des Ballens in den folgenden Rechnungen nicht mehr beachtet werden. Das Probefeld ist somit eindeutig abgesteckt.

Die Koordinaten für x_i werden im Zufallsgenerator unter folgender Bedingung generiert:

$$r_B + s_{\text{Bohrung}} \leq x_i \leq x_{\max} - r_B - s_{\text{Bohrung}} \quad \text{Gl. 5-4}$$

Alle Werte für x_i müssen kleiner als x_{\max} abzüglich des Bohrradius r_B und dem Sicherheitsbereich s_{Bohrung} sein, vergleiche Abb. 19. Zudem muss x_i größer sein als der Bohrradius r_B zuzüglich des Sicherheitsbereichs s_{Bohrung} . Selbige Bedingung beinhaltet die Koordinate y_i :

$$r_B + s_{\text{Bohrung}} \leq y_i \leq y_{\max} - r_B - s_{\text{Bohrung}} \quad \text{Gl. 5-5}$$

Da das Probefeld mit Bindungen durchzogen ist, können nicht in alle Bereiche Bohrpunkte gesetzt werden. Des Weiteren verhindert der Sicherheitsbereich um die Bindung s_{Bindung} einen direkten Kontakt des Bohrers mit selbiger. Bei kreuz- und vertikalgebundenen Ballen liegt die erste Bindung im Bereich zwischen 100 mm und 200 mm. Der Koordinatenursprung kann, bei entsprechendem Abstand zum Ballenrand, auf die erste Bindung gesetzt werden.

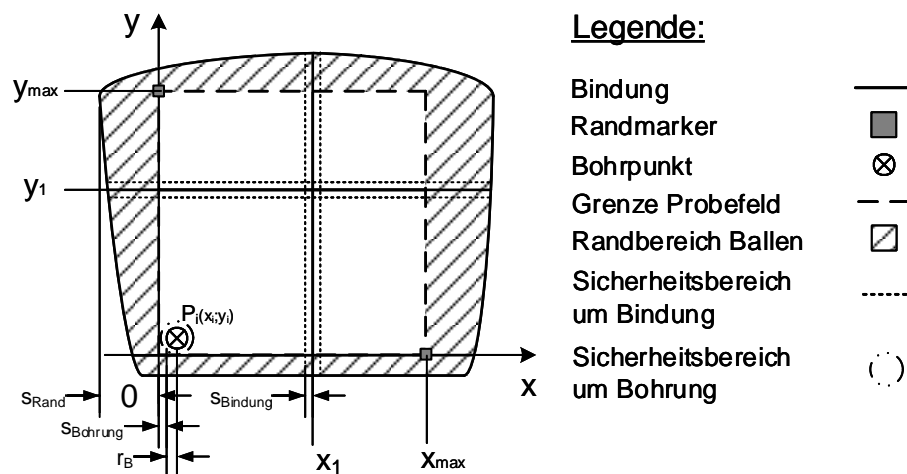


Abb. 19: Auf Randbereich angepasstes Koordinatenkreuz.

Zur Lageberechnung der Bindungen kommen im weiteren Verlauf Berechnungsverfahren basierend auf Geradengleichungen, dem Fällen eines Lotes und dem „Satz des Pythagoras“ zur Anwendung. Auf andere Berechnungsverfahren bspw. den Einsatz von Vektorrechnung oder Winkelfunktionen wird im Sinne der Übertragbarkeit auf einfache Computersysteme/Mikroprozessoren verzichtet. Diese Berechnung ist dann anzuwenden, wenn die Bindungen nicht parallel zueinander horizontal/vertikal verlaufen. Sind dagegen alle parallel und horizontal/vertikal, dann können die Werte für x_1 und y_1 zuzüglich des Sicherheitsbereichs um die Bindung aufgenommen werden, siehe Abb. 19.

Bei der Berechnung der Lage des Bohrpunktes zur Bindung sind die Sicherheitsbereiche s_{Bohrung} und s_{Bindung} sowie die Rand-/Bindungsmarker, siehe Abb. 20, zu beachten. Daraus ist allerdings ersichtlich, dass bei anliegendem Bohrpunkt an der Bindung - beide inkl. Sicherheitsbereich - mindestens eine Verdopplung des Sicherheitsbereichs auf 20 mm entsteht. Wenn die Notwendigkeit besteht, eine maximale Probefläche zu generieren, kann der Sicherheitsbereich s_{Bindung} mit 0 mm angenommen werden. Der dem Bohrpunkt umgebende Sicherheitsbereich s_{Bohrung} schützt damit alleinig die Bindung vor Zerstörung. Ein 10 mm großer Abstand des Bohrers zur Bindung hat bei den praktischen Versuchen keine Zerstörung dieser herbeigeführt.

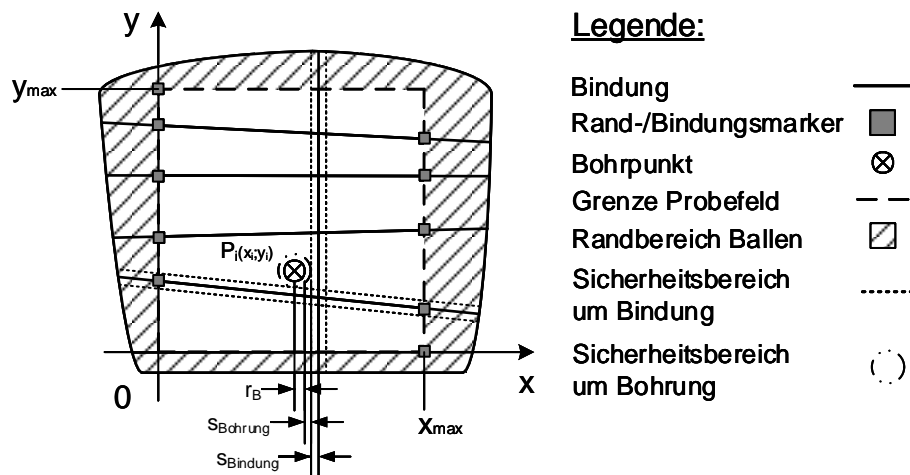


Abb. 20: Ballen mit gesetzten Bindungs- und Randmarkern.

Der Nullpunkt ist zur Vereinfachung der Berechnung auf die Grenze des Randbereichs in x- und y-Richtung gelegt, siehe Abb. 21. Gleichwohl können die Randbereiche außerhalb des 90° Winkels zur x-Achse stehen, welche Eigenschaft dann mit der Einbringung von weiteren Geradengleichungen beachtet werden muss.

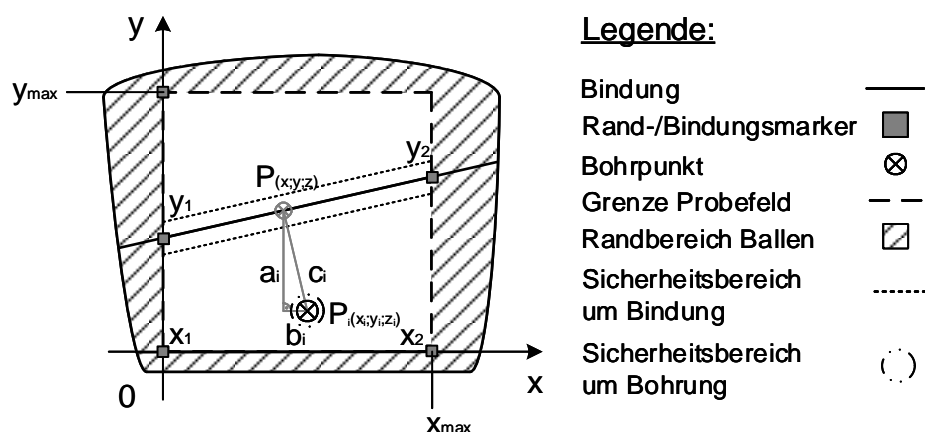


Abb. 21: Prüfung eines Bohrpunktes auf Lage zur Bindung.

Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen können entsprechende Geraden- und Steigungsgleichungen erstellt werden, im Beispiel für eine horizontal laufende Bindung:

$$f(x) = y = mx + n \quad \text{Gl. 5-6}$$

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{Gl. 5-7}$$

$$m = \frac{y_2 - n}{x_{\max}} \quad \text{Gl. 5-8}$$

Der fehlende Wert n liegt auf der y -Achse im Koordinatenkreuz und entspricht dem Wert für y_1 , siehe Gl. 5-8. Liegt der Ballen nicht mit der zu beprobenden Fläche im Koordinatenkreuz, ist n über Gl. 5-9 zu berechnen.

$$n = y - mx \quad \text{Gl. 5-9}$$

Ermittelt werden soll, in welchem Abstand der zu prüfende Punkt P_i zur Bindung und dem Sicherheitsbereich liegt. Die kürzeste Verbindung eines Punktes zur Geraden ist das Lot. Der Anstieg der Geraden zum Anstieg des Lots ist in Gl. 5-10 definiert. Sollte die Steigung der Geraden null betragen, ist der y -Wert der Referenzwert für den Abstand zum Bohrpunkt.

$$m * m_i = -1 \quad \text{für} \quad m \neq 0 \quad \text{Gl. 5-10}$$

$$m_i = \frac{-1}{m} \quad \text{Gl. 5-11}$$

$$n_i = y_i - m_i x_i \quad \text{Gl. 5-12}$$

Anhand der Steigung m_i im Punkt P_i kann unter Anwendung der Gl. 5-12 der Punkt n_i berechnet werden. Nach Gleichsetzen der beiden Geradengleichungen in Gl. 5-13 und Gl. 5-14 muss die Formel nach x umgestellt werden, siehe Gl. 5-15.

$$k(x) = f(x) \quad \text{Gl. 5-13}$$

$$m_i x_i + n_i = mx + n \quad \text{mit} \quad x_i = x \quad \text{Gl. 5-14}$$

$$x = \frac{n - n_i}{m_i - m} \quad \text{Gl. 5-15}$$

Im nächsten Schritt sind die Katheten a_i und b_i des entstehenden rechtwinkligen Dreiecks im Punkt P_i über die Gl. 5-16 und Gl. 5-17 zu berechnen. Anschließend wird mit dem „Satz des Pythagoras“ in Gl. 5-18 die Hypotenuse c_i berechnet. Der Bohrpunkt kann über oder unter der Bindung liegen und das Vorzeichen negativ sein. Durch die Quadrierung bei der Kathetenberechnung wird ein etwaiges negatives Vorzeichen positiv.

$$b_i = x_i - x \quad \text{Gl. 5-16}$$

$$a_i = y_i - y \quad \text{Gl. 5-17}$$

$$c_i^2 = a_i^2 + b_i^2 \quad \text{Gl. 5-18}$$

Die in Gl. 5-19 ermittelte Strecke ist die kürzeste Entfernung vom Bohrpunkt P_i zum Punkt P auf der Bindung. Diese muss mindestens genauso groß wie die Distanz bestehend aus dem Radius des Bohrers r_B und den Sicherheitsbereichen s_{Bindung} und s_{Bohrung} sein, siehe Gl. 5-20.

$$c_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \quad \text{Gl. 5-19}$$

$$c_i \geq r_B + s_{\text{Bindung}} + s_{\text{Bohrung}} \quad \text{Gl. 5-20}$$

Im weiteren Verlauf muss ebenfalls der Abstand zwischen zwei Bohrungen überprüft werden. Hierbei wird erneut die Gesetzmäßigkeit des „Satz des Pythagoras“ genutzt, wie in Abb. 22 und Gl. 5-21 dargestellt.

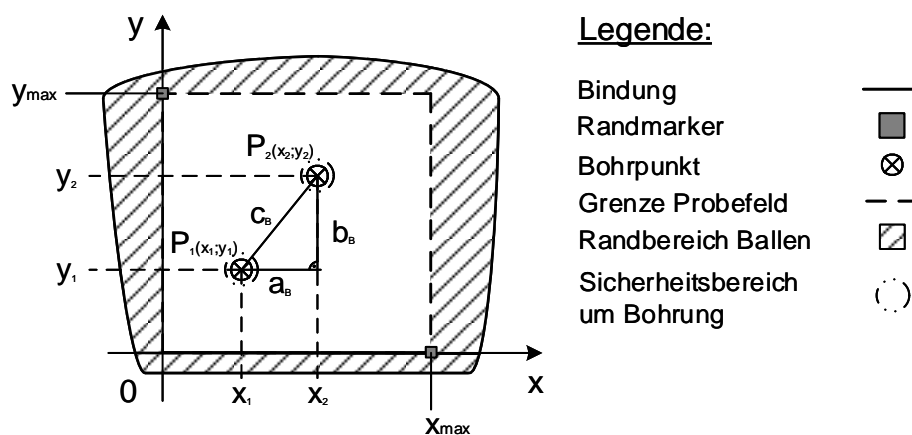


Abb. 22: Lage von Bohrpunkten zueinander.

Anders als bei dem Abstandsverhältnis zur Bindung muss der Abstand zweier Bohrungen mindestens dem Radius des Bohrers r_B plus dem Sicherheitsbereich des Bohrers s_{Bohrung} mal zwei entsprechen, siehe Gl. 5-22.

$$c_B = \sqrt{a_B^2 + b_B^2} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad \text{Gl. 5-21}$$

$$c_B \geq 2 * (r_B + s_{\text{Bohrung}}) \quad \text{Gl. 5-22}$$

5.3.3 Möglichkeiten des Erfassens/Abtrags von Entnahmekoordinaten

Zum Erfassen der Ballengeometrie kann der Ballen ganz konventionell vom Mitarbeiter aufgemessen und die Daten in das Rechensystem eingetragen oder ein automatisiertes Messsystem installiert werden. In Abb. 23 rechts ist auf dem Ballen in x-Richtung (Breite) eine Messskala (weiß) angebracht. Auf dem Bohrmaschinenträger ist die z-Richtung (Tiefe) mit einem Maßband (gelb) gekennzeichnet, siehe Abb. 23 links. Die y-Richtung (Höhe) wurde via Zollstock vom Boden aus bis zur Bohrermitte abgemessen. Im Rahmen der teilmaschinellen Entnahme der Volumenelemente bewährte sich das manuelle Ablesen der Entnahmekoordinaten.



Abb. 23: Möglichkeit des manuellen Ablesens der Entnahmekoordinaten.

Die Messungen müssen für den Maschinenbediener nachvollziehbar sein, sodass dieser bei Störungen eingreifen kann. Technische Hilfsmittel können Maßskalen oder Kamerasysteme sein. Da die Bindungen vom Ballenmaterial umschlossen sein können, benötigt ein Kamerasystem Orientierungspunkte, sogenannte Marker. Diese Bindungs- und Randmarker besitzen ein eindeutiges Muster und werden durch den Maschinenführer an entsprechende Stellen in den Ballen gesteckt. Ziel ist es, dass der Anwender dieser Technik lediglich die entsprechenden Punkte markiert und anschließend der Beprobungsvorgang automatisiert stattfindet.

5.4 Entnahmestrategie

Im Gegensatz zur händischen Entnahme von Laborproben aus einem Ballen, bei der eine Auftrennung der Bindungen notwendig ist, gibt es bei Anwendung der Ballenbeprobung zwei mögliche Entnahmearten, siehe Abb. 24. Sollte die Probenahmemaschine nicht flächig an der Pressrichtungsseite des Ballens anliegen, muss der Hohlraum in der Berechnung von z_i berücksichtigt werden.

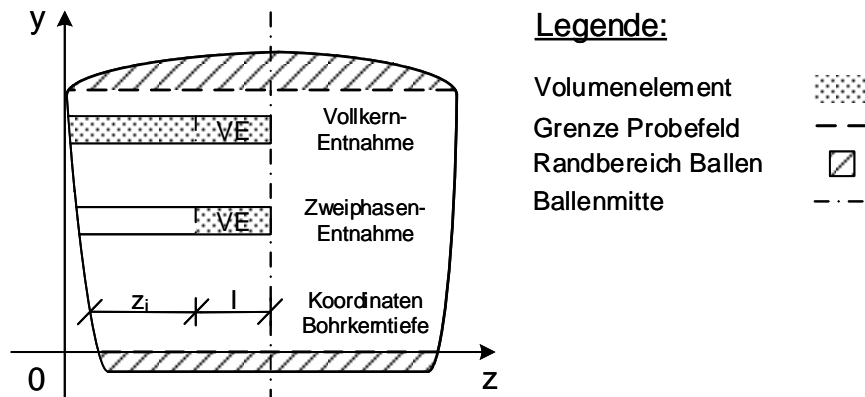


Abb. 24: Entnahmestrategien aus einem Ballen - Schnittdarstellung.

Alle zwei Entnahmearten sind teilmaschinell oder automatisiert durchführbar. Eine automatisierte Entnahme ist zu empfehlen, da mögliche Bedienfehler deutlich reduziert werden. Wird eine teilmaschinelle Entnahme durchgeführt, dann sind die Volumenelemente per Hand aus dem Bohrkernrohr zu entnehmen. Bei der Vollkernentnahme kann sich das Volumenelement während der Entnahme aus dem Rohr ausdehnen. Der Einsatz einer Schablone oder eines Maßstabs in Länge des Volumenelements kann eine deutliche Verbesserung der Arbeitsgenauigkeit bewirken und Fehler aufgrund von Ausdehnungseffekten reduzieren. Vorteilhaft ist die Vollkernentnahme im Hinblick auf den Zeitaufwand, da lediglich zwei Arbeitstakte für den Entnahmeprozess benötigt werden. Unter Anwendung der Zweiphasenentnahme werden vier Arbeitstakte benötigt:

1. Bohren bis zum Anfang des zufällig bestimmten VE.
2. Herausfahren des Bohrers und Entnahme des zu verworfenden Bohrkerns.
3. Einfahren des Bohrers bis zum Ende des zufällig bestimmten VE.
4. Herausfahren des Bohrers und Entnahme des VE.

Für die Vollkernentnahme werden dagegen lediglich die Arbeitstakte drei und vier benötigt. Hierbei entsteht die größte thermische Belastung der Materialien. Diese kann durch konstruktive Maßnahmen deutlich verringert werden.⁷⁹ Bei Anwendung der Vollkernentnahme wird das gesamte VE am Stück bis zum Ende ausgebohrt. Es können Bohrer eingesetzt werden, die der Tiefe des Ballens entsprechen oder solche, die die halbe Tiefe des Ballens erreichen können. Ferner weist die Zweiphasenentnahme eine geringere thermische Belastung auf, da der Bohrer beim Entleeren der zu verworfenden VE abkühlen kann.

⁷⁹ Vgl. Kapitel 6.2 Umgang mit Verschmelzungserscheinungen.

Des Weiteren bestimmen physikalische und chemische Anforderungen an die Laborprobe die Entnahmeart. Soll eine Laborprobe zu einer Analysenprobe für die Chlorbestimmung weiterverarbeitet werden, sind nach Möglichkeit Temperaturen über 40 °C zu vermeiden. Wird die Laborprobe einer Sortieranalyse per Hand unterzogen oder durch eine Nahinfrarotmaschine analysiert, dürfen keine Verschmelzungen von Kunststoffmaterialien vorliegen. Ziel ist es, dem Ballen eine Laborprobe zu entnehmen, welche ein repräsentatives Abbild des Balleninneren darstellt. Die herausgebohrten Volumenelemente sind zylinderförmig und entsprechen in ihrem Durchmesser dem Innendurchmesser des Bohrkopfes. Gleichwohl können einzelne Bestandteile eine größere Fläche aufweisen, da sie durch den Pressprozess mehrfach gefaltet werden.

5.4.1 Volumenbasierte Entnahmestrategie

Bei Anwendung der volumenbasierten Entnahmestrategie werden zwei Personen zur Bedienung der Maschine benötigt. Empfohlen wird die Anwendung der Zweiphasenentnahme. Über ein computergeneriertes Zufallssystem werden die x-, y- und z-Koordinaten dem Maschinenbediener bereitgestellt. Der Maschinenführer bohrt einen zusammenhängenden Kern bis vor das betreffende Volumenelement aus. Anschließend erfolgt ein Bohrerwechsel um darauffolgend das interessierende Volumenelement auszubohren. Beide Bohrer sollten einen Durchmesser zwischen 20 mm und 60 mm besitzen. Alternativ besteht die Möglichkeit, einen Vollkern zu entnehmen und das betreffende Volumenelement zu separieren. Dieses Vorgehen verringert den Aufwand für den Werkzeugwechsel und kann zu Ungenauigkeiten bei der Separation des betreffenden Volumenelements führen.

5.4.2 Massenbasierte Entnahmestrategie

Für die Bedienung der Maschine sind zwei Personen zu empfehlen. Da in heutigen Recyclingprozessen mit Massenangaben der umgeschlagenen Ballen gearbeitet wird, ist die Berechnung der benötigten Vollkerne unter Einbeziehung des Bohrkernbohrer-Volumens gut anwendbar. Die Maschine besitzt zwei Kernbohrer mit 100 mm Durchmesser, die abwechselnd verwendet werden. Der Grund für die Durchmesserergrößerung ist die benötigte Masse. Ein Mitarbeiter bedient die Maschine, der andere entnimmt die Volumenelemente aus dem Bohrer und wechselt das Werkzeug aus. Für diese Art der Beprobung ist es zielführend, die Vollkernentnahme anzuwenden. Mit dem Zufallsgenerator werden dafür die x- und y- Positionen generiert, die vom Maschinenführer angefahren werden müssen. Es sind beide Pressrichtungsseiten des Ballens, unter Verwendung eines bis zur halben Tiefe des Ballens reichenden Kernbohrers, zu beproben.

5.4.3 Programmablauf zur Erstellung eines zufallsgenerierten Probenentnahmeplans

Der in Abb. 25 zu sehende Ablaufplan beschreibt die Erstellung eines zufallsgenerierten Probenentnahmeplans für die Ballenbeprobung. Die Geometrie und die Lage der Bindungen wird vom Nutzer eingegeben. In diesem Rahmen werden mittels Transformationsfaktoren die zufälligen Koordinaten berechnet.

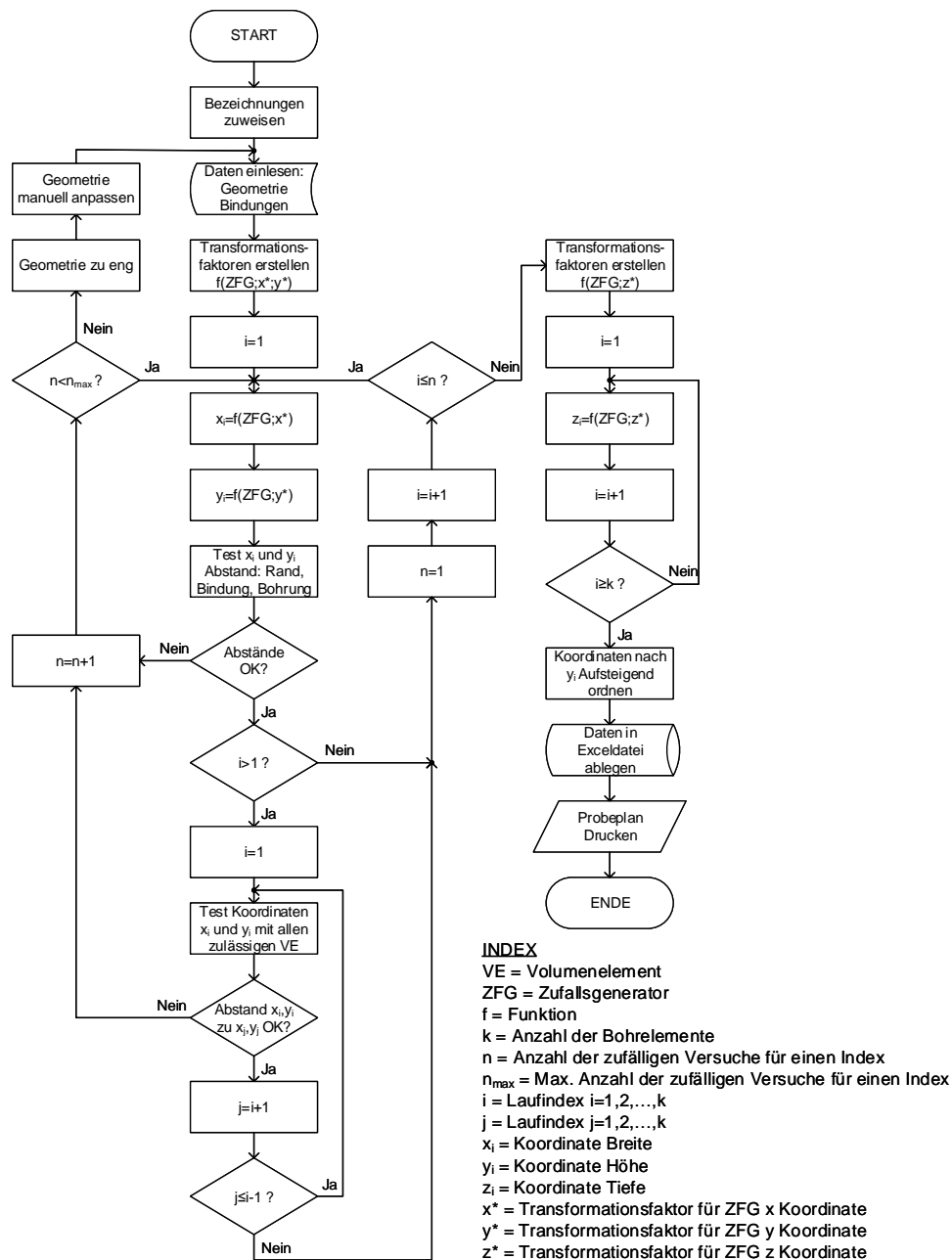


Abb. 25: Ablaufplan für einen zufallsgenerierten Probenentnahmeplan.

Berücksichtigt werden die Abstände zu dem Randbereich sowie den Bindungen und Bohrungen. Der Zufallsgenerator läuft solange bis k Bohrelemente ordnungsgemäß erzeugt wurden. Durch die Eingabe von n_{max} ist die maximale Anzahl an Durchläufen des Zufallsgenerators zu wählen. Dies verhindert u. a., dass das Programm unendlich weiterläuft. Sind alle Koordinaten ordnungsgemäß erzeugt, werden diese nach y_i vom kleinsten Wert aufsteigend sortiert, in eine Excel-Datei geschrieben und ausgedruckt.

5.5 Ballenbeprobung auf Basis zufallsgenerierter Entnahmekoordinaten – Verfahren Ballenbeprobung ZG

Für die „Ballenbeprobung zufallsgeneriert“ (BP-ZG) dienen die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Konventionen und Ergebnisse als Grundlage des Verfahrens. Innerhalb der DIN 54385:2016-08 Pressbohrmethode besteht eine Beschränkung des unverdichteten Volumens der Laboratoriumsprobe auf zehn Liter.⁸⁰ Die in Abb. 26 dargestellten Formeln zur Berechnung der Anzahl der Volumenelemente bei unterschiedlichen Bohrerdurchmessern in Abhängigkeit der Volumenelementlänge sind auf Grundlage der Excel-Berechnung im Anhang F: Berechnungen Ballenbeprobung ZG erstellt worden.

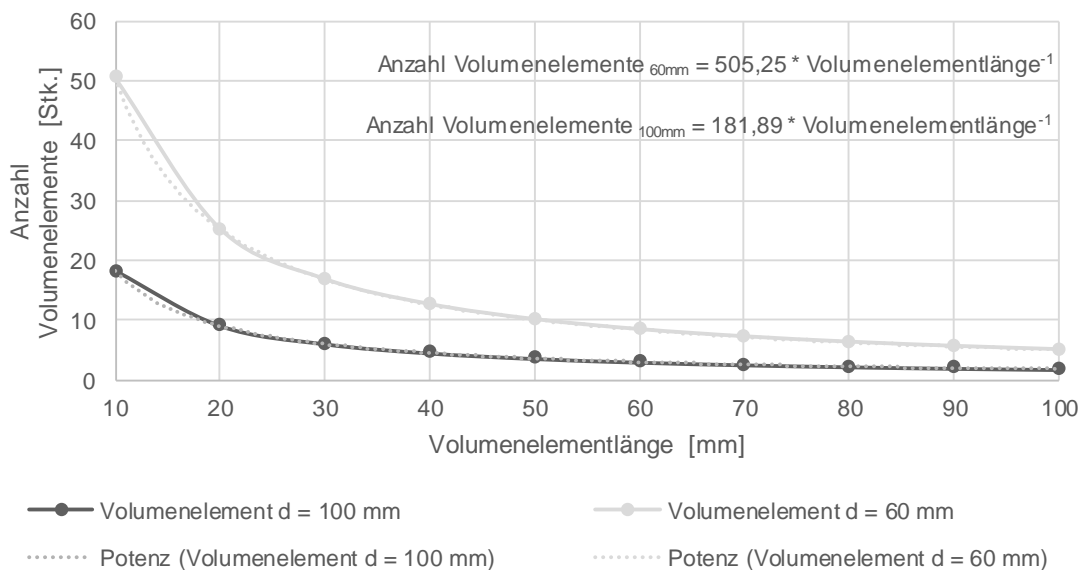


Abb. 26: Anzahl Volumenelemente für Verfahren Ballenbeprobung ZG.

In Abb. 26 sind zwei nutzbare Bohrerndurchmesser, 60 mm und 100 mm, dargestellt. Basis für die Berechnung bildet der empirisch ermittelte durchschnittliche Verdichtungsgrad $k_{\text{Verdichtung}}$ von sieben. In Verbindung mit dem Volumen der benötigten Laborprobe $V_{\text{Laborprobe}}$ und des Volumenelements V_{VE} kann die Anzahl der Volumenelemente pro Ballen $n_{\text{BP-ZG}}$ berechnet werden:

$$n_{\text{BP-ZG}} = \frac{V_{\text{Laborprobe}}}{V_{\text{VE}}} * \frac{1}{k_{\text{Verdichtung}}} \quad \text{Gl. 5-23}$$

Pro Ballen sind zwei Mischproben zu erstellen. Je Presse Seite wird eine Mischprobe generiert und die Anzahl der Volumenelemente diesbezüglich aufgeteilt. Ausgehend von einem Bohrer mit dem Durchmesser von 60 mm müssen bei einer Volumenelementlänge von 100 mm rund 5 Volumenelemente aus dem Ballen gebohrt werden.⁸¹

⁸⁰ Vgl. DIN 54385:2016-08, S. 24.

⁸¹ Vgl. Anhang F: Berechnungen Ballenbeprobung ZG.

5.6 Übertragung des Verfahrens Ballenbeprobung ZG auf ausgewählte Richtlinien und Normen

Die in den Kapiteln 4.2.2 bis 4.2.5 beschriebenen Probenahmemethoden für Sekundärrohstoffe haben gemeinsam, dass sie keine Beprobung von Ballen vorsehen. Damit eine willkürliche Beprobung ausgeschlossen wird, ist in den folgenden Kapiteln die Übertragung des Verfahrens der Ballenbeprobung ZG unter Berücksichtigung bestehender Richtlinien und Normen durchgeführt worden.

Ziel ist es, die notwendige Anzahl zu prüfender Ballen und Volumenelemente zu ermitteln. Eine Entnahme der Probenmenge soll mit Bohrkernbohrern erfolgen. Anschließend kann die Probe einer Sortieranalyse, siehe Abb. 27, zugeführt werden.



Abb. 27: Arbeitsplatz zur Sortierung von Bohrkernproben.

Dem Anwender vor Ort stehen lediglich Informationen im begrenzten Umfang zur Verfügung. Diese beschränken sich in der Regel auf das Qualitätsprüfungsschema des Grünen Punktes mit der entsprechenden Kennzeichnung per Handzettel für jeden einzelnen Ballen und die dazugehörige Produktspezifikation.⁸² Prinzipiell muss entschieden werden, ob die Probenanzahl anhand des Gewichtes oder des Volumens bestimmt wird. Beide Varianten haben Vorteile. Schüttvolumina bilden die Grundlage von angewandten Probenahmeverfahren. Allerdings werden bei Feststoffen nicht die Volumina, sondern lediglich die Massen in den Frachtpapieren ausgewiesen.

In den Verfahren werden die Funktionen unter Zuhilfenahme von Excel-Trendlinien mit dazugehörigen Formeln beschrieben. Die Formeln sind für eine Berechnung zu bevorzugen. Gleichwohl kann auf die berechneten Werte in den Anhängen F bis I zurückgegriffen werden. Vorteilhaft ist die Übertragung von Formeln in Computersysteme, da hiermit die Information über die zu entnehmenden Volumenelemente in kompakter Form vorliegt.

⁸² Vgl. Der Grüne Punkt, (Qualitätsprüfungsschema, 2016), S. 1.

5.6.1 Übertragung Ballenbeprobung ZG auf LAGA PN 98 – Verfahren BP-PN 98 ZG

Die Handlungsanweisung der LAGA PN 98 kann nur bedingt an die Ballenbeprobung angepasst werden. Am geschlossenen Ballen kann keine Korngröße bestimmt werden. Dazu ist der Ballen aufzuschneiden, was nicht das Ziel der Ballenbeprobung ist. Jedoch kann die Prüfung auf Homogenität/Heterogenität entfallen, da Abfälle, mit Ausnahme von Stäuben und Reaktionsprodukten aus Rauchgasreinigungsanlagen, als heterogen gelten. Im Einzelfall kann eine organoleptisch-sensorische Ansprache herangezogen werden.⁸³ Nachfolgend sind die Formeln zur Bestimmung der Ballenanzahl sowie der Anzahl zu entnehmender Volumenelemente aufgeführt. Der gesamte Rechenweg ist im Anhang G: Berechnungen BP-PN 98 ZG dargestellt. Zudem sind die Formeln und Grafiken unter Zuhilfenahme von Excel generiert worden.

Die Volumen-, Schüttdichte- und Massenbestimmung ist durchführbar, da jeder Ballen gewogen und das Gewicht auf einer Karte notiert wird. Aus jedem zu untersuchenden Ballen $n_{\text{BallenBP-PN98ZG}}$ sind mindestens zwei Mischproben m_1 zu entnehmen.⁸⁴

$$n_{\text{BallenBP-PN98ZG}} = \frac{m_1}{2} \quad \text{Gl. 5-24}$$

Mit dem Volumen der Laborprobe $V_{\text{Laborprobe}}$ und des Volumenelements V_{VE} , des Verdichtungsgrades $k_{\text{Verdichtung}}$ sowie der Anzahl zu beprobender Ballen $n_{\text{BallenBP-PN98ZG}}$ kann die Anzahl der zu entnehmenden Volumenelemente pro Ballen $n_{\text{BP-PN98ZG}}$ berechnet werden:

$$n_{\text{BP-PN98ZG}} = \frac{V_{\text{Laborprobe}}}{k_{\text{Verdichtung}} * V_{\text{VE}} * n_{\text{BallenBP-PN98ZG}}} \quad \text{Gl. 5-25}$$

Bei einer festen Länge des Volumenelements bleibt die Anzahl der zu entnehmenden Volumenelemente, bei konstantem Durchmesser des Kernbohrers, gleich.⁸⁵ Es ändert sich lediglich die Menge der zu beprobenden Ballen, in Abhängigkeit von der Grundmenge, siehe Abb. 28.

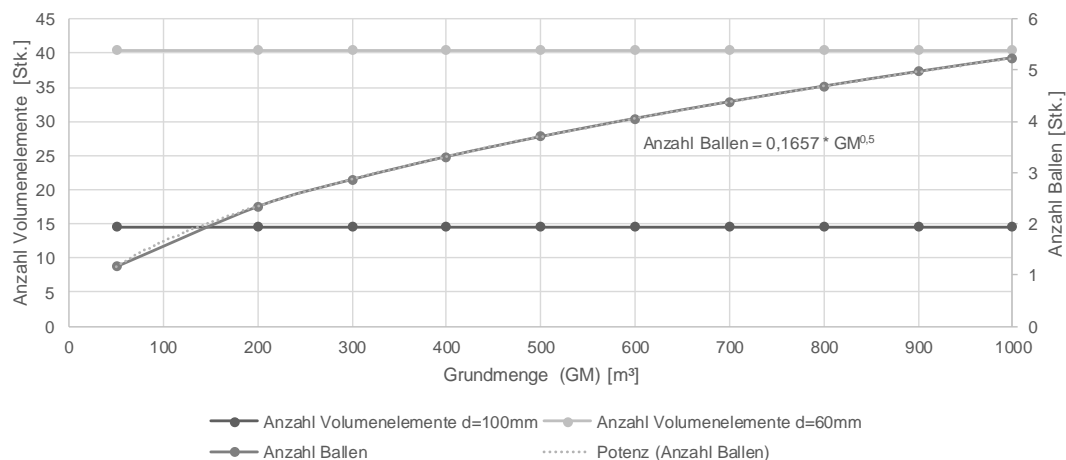


Abb. 28: Anzahl Volumenelemente und Ballen Verfahren BP-PN 98 ZG.

⁸³ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA, (LAGA PN 98, 2004), S. 13 f.

⁸⁴ Ebenda, S. 66.

⁸⁵ Vgl. Anhang G: Berechnungen BP-PN 98 ZG.

Durchschnittlich sind Ballen siebenfach verdichtet. Bei einer Kernbohrerlänge von 600 mm beträgt die Länge eines Volumenelements 100 mm. Durch Variation der Grundmenge verändert sich die Anzahl der zu beprobenden Ballen.⁸⁶ Bei einem Bohrerdurchmesser von 60 mm sind 40 Volumenelemente und bei 100 mm 15 Volumenelemente pro Ballen in Pressrichtung zu entnehmen. Wird eine LKW-Ladung mit 20 Ballen geliefert, sind unter der Annahme eines durchschnittlichen, unverdichteten Ballenvolumen von 9,1 m³ zwei Ballen⁸⁷ zu beproben.⁸⁸ Dies entspricht einer Grundmenge von rund 200 m³.

5.6.2 Übertragung Ballenbeprobung ZG auf DIN 19698-2:2016-12 Integrale Charakterisierung – Verfahren BP-Integral ZG

Vorteilhaft für die Übertragung der Ballenbeprobung ZG auf die DIN 19698-2:2016-12 Integrale Charakterisierung ist die Nutzung der Grundmenge des Abfalls.⁸⁹ Nachfolgend sind die Formeln zur Bestimmung der Ballenanzahl sowie der Anzahl zu entnehmender Volumenelemente aufgeführt. Der gesamte Rechenweg ist im Anhang H: Berechnungen BP-Integral ZG dargestellt. Des Weiteren sind die Formeln und Grafiken unter Zuhilfenahme von Excel generiert worden.

Mit der Verwendung des Verdichtungsgrades ist die Berechnung der verdichteten Laborprobe $V_{\text{Laborprobe-k}}$ möglich. Wird dieses Volumen durch das Volumen eines Volumenelements V_{VE} geteilt, kann die Anzahl der verdichteten Volumenelemente n_{VE} bestimmt werden. Um die Anzahl der zu entnehmenden Volumenelemente pro Ballen $n_{\text{BP-IntegralZG}}$ zu ermitteln, muss n_{VE} durch die Anzahl der zu beprobenden Ballen $n_{\text{BallenBP-IntegralZG}}$ geteilt werden.

$$n_{\text{VE}} = \frac{V_{\text{Laborprobe-k}}}{V_{\text{VE}}} \quad \text{Gl. 5-26}$$

$$n_{\text{BP-IntegralZG}} = \frac{n_{\text{VE}}}{n_{\text{BallenBPIntegralZG}}} \quad \text{Gl. 5-27}$$

Als Grundmenge dient eine Ballenlieferung von 20 Ballen auf dem LKW. Voraussetzung ist die Umrechnung in ein unverdichtetes Haufwerk. Ausgehend von rund 200 m³ unverdichtetem Material müssen, wie in Abb. 29 dargestellt, zwei Ballen beprobt und jeweils 69 VE à 100 mm Länge mit einem 60 mm Kernbohrer herausgebohrt werden.

⁸⁶ Vgl. Anhang G: Berechnungen BP-PN 98 ZG.

⁸⁷ Ballenauswahl siehe Kapitel 5.2.

⁸⁸ Vgl. Anhang A: Daten Ballendimensionen.

⁸⁹ Vgl. DIN 19698-2:2016-12, S. 14 ff.
Vgl. Anhang H: Berechnungen BP-Integral ZG.

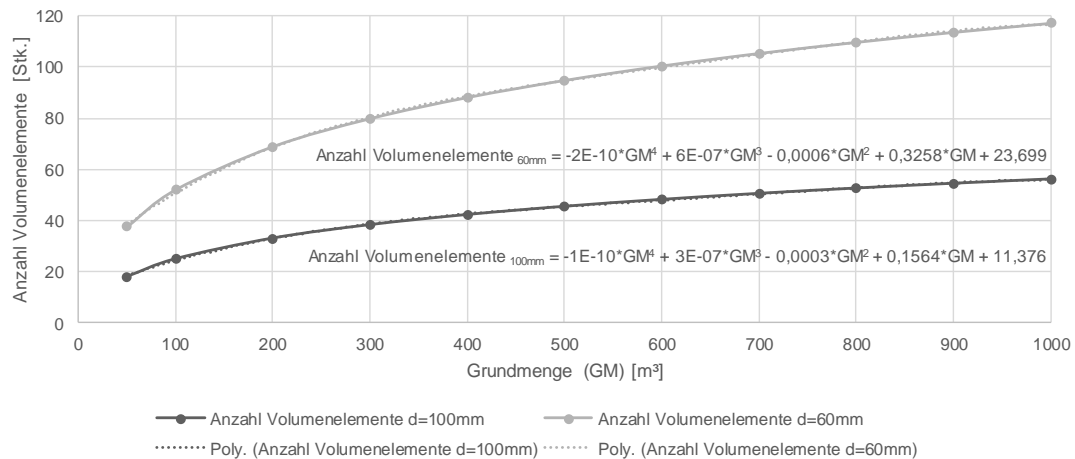


Abb. 29: Anzahl Volumenelemente Verfahren BP-Integral ZG.

Sollen mittels der Methode „BP-Integral ZG“ mehrere Ballen kontrolliert werden, gibt die DIN ISO 18414:2012-02 eine Hilfestellung bei der Berechnung der Anzahl der Ballen $n_{\text{BallenBP-IntegralZG}}$.⁹⁰

$$n_{\text{BallenBP-IntegralZG}} = \frac{N}{(K + N) * a_{MD} + 1} \quad \text{Gl. 5-28}$$

Die Anzahl der VE sinkt auf 66 Stück unter Verwendung eines 60 mm Kernbohrers. Jene Abweichung ist auf Rundungen im Excel-Programm zurückzuführen (Ballenanzahl).

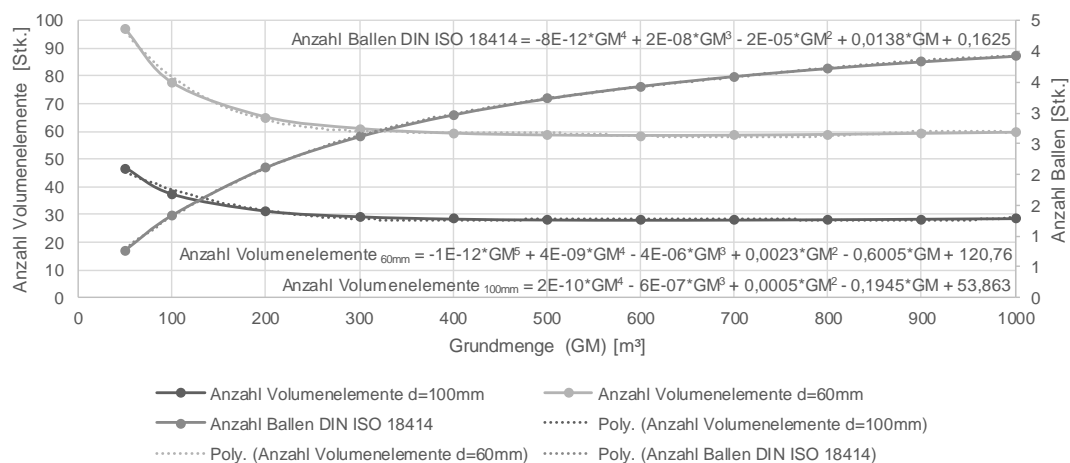


Abb. 30: Anzahl Volumenelemente und Ballen Verfahren BP-Integral ZG.

Die Funktionen in Abb. 29 und Abb. 30 besitzen Ähnlichkeiten mit logarithmischen Verläufen. Allerdings stimmten entstandene Trendlinien im Excel-Programm nicht mit dem tatsächlichen Verlauf überein, weshalb zur hinreichend exakten Beschreibung Gleichungen vierten und fünften Grades verwendet wurden.

⁹⁰ Vgl. DIN ISO 18414:2012-02, S. 14 ff.

5.6.3 Übertragung Ballenbeprobung ZG auf die Sortierrichtlinie des Grünen Punktes – Verfahren BP-Sortier ZG

Im Durchschnitt besitzen die zu Ballen gepressten DSD-Fractionen eine Ballendichte ρ_{Ballen} von 409 kg/m³. Um die Proben aus den Ballen zu bohren, können Bohrkernbohrer mit einem Durchmesser von 60 mm und 100 mm verwendet werden. Die Länge des Bohrers wird mit 600 mm angenommen.

$$\rho_{\text{Ballen}} = \frac{m_{\text{Ballen}}}{V_{\text{Ballen}}} \quad \text{Gl. 5-29}$$

$$n_{\text{BP-SortierZG}} = \frac{m_{\text{Probe}}}{\rho_{\text{Ballen}}} * \frac{1}{V_{\text{Bohrer}}} \quad \text{Gl. 5-30}$$

Hierbei berechnet sich die Anzahl der zu entnehmenden Volumenelemente $n_{\text{BP-SortierZG}}$ nach Gl. 5-30. Zu beachten ist die Probenmenge m_{Probe} , die Ballendichte und das Volumen des Bohrers V_{Bohrer} . Die Formeln und Grafiken sind unter Zuhilfenahme von Excel generiert worden.

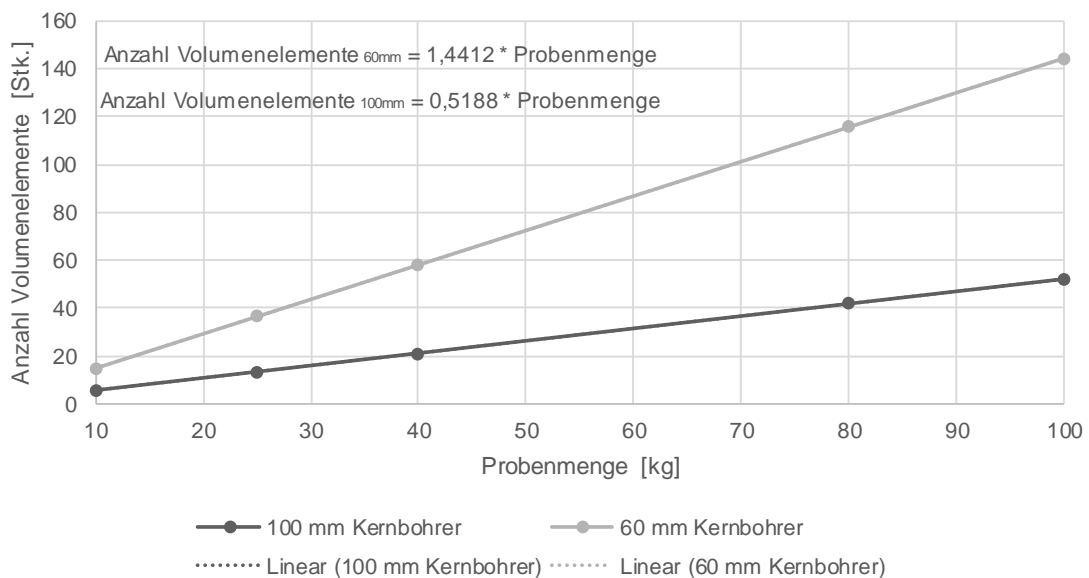


Abb. 31: Anzahl Volumenelemente Verfahren BP-Sortier ZG.

In Abb. 31 ist die Anzahl der Volumenelemente über der benötigten Probenmenge für Bohrkernbohrer mit den Durchmessern von 60 mm und 100 mm abgetragen. Beide Bohrkernbohrer sind 600 mm lang. Angenommen wird die durchschnittliche Ballendichte von 409 kg/m³. Während bei Verwendung eines Bohrkernbohrers mit einem Durchmesser von 60 mm bei einer benötigten Probenmenge von 40 kg rund 58 Kerne aus dem Ballen gebohrt werden müssen, sind es bei Verwendung eines 100 mm Bohrkernbohrers rund 21 Kerne.⁹¹ Wird der Fokus auf die Entnahme von 100 mm langen VE gelegt, sind für eine 10 kg Probe rund 14 VE zufällig aus dem Ballen zu entnehmen.

⁹¹ Vgl. Anhang I: Berechnungen BP-Sortier ZG.

5.6.4 Vergleich der diskutierten Verfahren

Durch die Wahl des gleichen Bohrerdurchmessers, der Volumenelementlänge und der Grundmenge wurde versucht, Grundlagen für den Vergleich in Tab. 2 zu schaffen. Ersichtlich ist, dass die herausgebohrte Menge unterschiedlich groß ist. Die Anzahl der zu beprobenden Ballen und das zu entnehmende Volumen bzw. die entnehmbare Masse schwankt innerhalb der Verfahren. Ähnlichkeiten sind bei den Verfahren „Ballenbeprobung ZG“ (1x5 VE) und „BP-Integral ZG“ (2 x 69 VE) festzustellen. Handhabbar mit dem Bohrkernbohrer sind, neben dem Verfahren „BP-Sortier ZG“ (1x14 VE), alle. Das Verfahren „BP-PN 98“ (2 x 40 VE) besitzt für die gewählte Konfiguration anwendbare Merkmale. Aufgezeigt wird, dass die Bohrtechnik und die Wahl des passenden Verfahrens einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der Volumenelemente hat. Die Beprobung einer hohen Anzahl von Volumenelementen sollte durch automatisierte Probenehmer realisiert werden.

Tab. 2: Vergleich der entwickelten Verfahren.

Gleiche Grundlage: Bohrerdurchmesser, Volumenelementlänge und Grundmenge.

Verfahren	Bohrerdurchmesser [mm]	Volumenelementlänge [mm]	Grundmenge unverdichtet [m³]	Anzahl Volumenelemente pro Ballen [Stk.]	Anzahl zu beprobender Ballen [Stk.]	Herausgebohrte Menge (unverdichtet)	Anwendungsfähig?
Ballenbeprobung ZG	60	100	200	5	1	10 L	JA
BP-PN 98 ZG				40	2	188 L	JA
BP-Integral ZG				69	2	270 L	JA
BP-Sortier ZG				14	1	10 kg	JA

Zweckdienlich ist die Verwendung der bereits vorhandenen Angaben hinsichtlich des Ballengewichtes für den entsprechend zu untersuchenden Ballen. Dieses Gewicht ist in der elektronischen Datenverarbeitung hinterlegt und befindet sich ebenfalls auf einem Zettel, der jedem Ballen angeheftet ist. Mit Hilfe der in dieser Dissertation aufgestellten formelmäßigen Zusammenhänge zwischen dem Ballengewicht, den Abmessungen des Ballens, der benötigten Probenmenge und der verwendeten Bohrer kann zügig die benötigte Volumenelementanzahl ermittelt werden. Anhand der Einbeziehung von vor Ort ermittelbaren Parametern, wird der Einfluss von unterschiedlicher Sortier- und Verdichtungstechnik fast vollständig reduziert. Mit der einfachen Berechnung der Ballendichte kann erreicht werden, dass bei jeder Probenahme eine ähnliche Probenmenge aus dem Ballen entnommen wird. Im Rahmen einer händischen Entnahme von Ballenmaterialien sind die Schwankungen im Probengewicht hoch. Nicht ohne Grund schreibt der Grüne Punkt für die entnommene Probe ein Probengewicht von 80 kg bis 100 kg vor. Grundlage einer wiederholbaren und repräsentativen Probenahme ist die Abtrennung von physikalisch gleichen Proben aus dem entsprechenden Ballen.

6 Entwicklung der Bohrtechniken zur Beprobung von Ballen

Aufgrund der heterogenen Anordnung der Wertstoffe in einem Ballen sind darauf angepasste Bohrtechniken entwickelt worden. Diese Techniken setzen sich u. a. aus dem zu beprobenden Material, der Bohrerdimensionierung, der Bohrerndrehzahl und dem Bohrervorschub zusammen. Daraus werden Einsatzzeiten abgeleitet, welche für eine zügige Durchführung der Probenahme zu beachten sind. Bisher gab es drei physisch existierende Entwicklungsstufen. Die erste Entwicklungsstufe bestand aus einem an Ketten befestigten Metallrahmen, auf dem eine Bohrmaschine installiert war. Über eine fahrbare Traverse konnte die Bohrmaschine direkt an den Ballen gefahren und per Hand von zwei Benutzern bedient werden. Als Bohrer kam ein 1000 mm langer Schlangenbohrer⁹² zum Einsatz, der sich nicht bewährte. Speziell im Ballen anzutreffende Folien wickelten sich um den Bohrer, sodass eine Beprobung nicht mehr stattfinden konnte. Außerdem war die Arbeit mit der Maschine gefährlich, da der Bohrer blockieren und das Gestell ausschlagen konnte. Die Tauglichkeit der Ballenbeprobung konnte mit dieser Einrichtung dennoch bestätigt werden. Da der Schlangenbohrer die gestellten Anforderungen nicht erfüllen konnte, wurde der Fokus auf die Entwicklung von Kernbohrern gelegt.



Abb. 32: Entwicklungsstufen der Beprobungsmaschine für Ballen.

Für die Prüfung der konstruierten und zugekauften Bohrer stand eine speziell für diesen Zweck entwickelte Ballenbeprobungsmaschine zur Verfügung, siehe Abb. 32 Mitte. Die Maschine besitzt lediglich eine fahrbare Achse in z-Richtung. Jene Achse wird via Antriebsmotor anhand der Drehzahländerung über einen Frequenzumrichter gesteuert. Dabei erfolgt die Vorschubregelung über Hand und nach Gehör. Auf der Achse ist eine Bohrmaschine vom Typ Bosch GBM 32-4 Professional mit einer Nennleistung von 1500 W befestigt. In die Maschine können Schlangenbohrer, Forstnerbohrer oder Kernbohrer eingebaut und genutzt werden. Die maximal nutzbare Hublänge beträgt 1000 mm. Zur Unterstützung des Bohrers bei großen Längen können Haltegestelle an die Maschine gebaut werden. Dadurch kann sich die Hublänge der Maschine auf maximal 800 mm reduzieren. Zur Beprobung des Ballens wird die Maschine frontal an den Ballen herangefahren und die Räder blockiert. Mittels Spanngurten wird diese an den Ballen arretiert, sodass weder Ballen noch Maschine vom Bohrer während des Bohrvorgangs weggedrückt werden können. Die Achse in z-Richtung wird über den eingebauten

⁹² Mit Spiralbohrer vergleichbar.

Frequenzumrichter für den Motor vor Überlast geschützt. Steigt der Motorstrom höher als es die zugelassene Grenze erlaubt, wird der Motor über den Frequenzumrichter abgeschaltet.

Für Versuche im Feld ist ein mobiler Ballenbeprober entwickelt und gebaut worden, siehe Abb. 32 rechts. Mit diesem ist es möglich, vor Ort bei den Ballenproduzenten/-recyclern eine Probenahme durchzuführen. Kenntnisse über die physikalischen Eigenschaften beim Bohrvorgang werden in den folgenden Kapiteln vermittelt und geben Richtwerte für ausgewählte Ballen vor. Die Gesetzmäßigkeiten sind auf andere Ballen übertragbar, können jedoch in ihren Auswirkungen unterschiedliche Tragweiten entwickeln. Generell sollte die eingesetzte Bohrtechnik vor Beprobung eines fremden bzw. neuen Ballentyps an diesem getestet werden. Meist genügt schon ein Bohrvorgang, um eventuelle Abweichungen vom Soll aufzuzeigen.

Grundsätzlich ist die Wahl des Bohrers vom zu bohrenden Material abhängig. Dabei sind die Härte und die Duktilität des zu bohrenden Materials zu beachtende Kenngrößen. Danach richten sich die Zerspanungsart und die Dimensionierung der Bohrerschneiden. Das klassische Bohren mit Spiralbohrern ist ein Schruppverfahren, bei dem mit jeder Umdrehung des Bohrers, unter Einwirkung einer Vorschubkraft, eine definierte Materialmenge abgetragen und über den Spiralkörper nach außen befördert wird. Kernbohrer erfassen im Gegensatz zu Spiralbohrern nicht die gesamte Fläche, sondern lediglich den Randbereich. Bei harten Materialien oder großen Bohrdurchmessern ist dies von Vorteil, da die Vorschubkraft erhöht werden kann und infolgedessen der Bohrvorgang zügiger abläuft. Das Volumenelement liegt nach Beendigung des Bohrvorgangs im Ganzen vor. Da der Bohrlochinhalt vom Spiralbohrer zerspannt wird, ist der Einsatz nur dann zu empfehlen, wenn das Bohrgut chemisch-analytisch untersucht werden soll und der zu bohrende Werkstoff geeignet ist. Wird dagegen der Fokus auf bestimmte Stoffe innerhalb des Bohrdurchmessers gelegt und sollen diese optisch ermittelt werden, empfiehlt sich der Einsatz von Kernbohrern.

6.1 Getestete und angepasste Bohrwerkzeuge

Vor der Konstruktion von Bohrwerkzeugen für den Einsatz in der Ballenbeprobung waren vielseitige Fragestellungen zu beantworten. Zuerst musste das zu bohrende Material definiert und untersucht werden. Es sind Versuchsreihen mit bereits existierenden Bohrern durchgeführt worden, um Rückschlüsse auf eine Konstruktion neuer Bohrer zu ziehen. Die Bohrwerkzeuge wurden an einem Folienballen der Produktspezifikation 310 und einem PET-Ballen der Produktspezifikation 328-2 erprobt. In den Anhängen O, P und Q sind ausgewählte Ergebnisse zusammengefasst. Ferner befinden sich im Anhang V: Daten DVD diverse Bildnachweise zu den getätigten Bohrversuchen.

6.1.1 Schlangen- und Forstnerbohrer

Beim Schlangenbohrer handelt es sich um die gebräuchlichste Form von Bohrern. Als Allzweckbohrer findet dieser Anwendung im Bauwesen und bei der Holz- sowie Metallbearbeitung. Für die Ballenbeprobung wurde eine Spezialanfertigung in der Länge von 1000 mm und einem Durchmesser von 60 mm beschafft. Der vorliegende Forstnerbohrer, welcher hauptsächlich im Bereich der Holzbearbeitung eingesetzt wird, ist ebenfalls eine Spezialanfertigung. Er besitzt eine Länge von 1100 mm und einen Durchmesser von 60 mm, siehe Abb. 33. Im Fall der durchgeführten Probebohrungen am Folienballen stellte sich sehr zügig heraus, dass diese beiden Bohrertypen für eine Probenahme in Ballen mit hohen Folienanteilen ungeeignet sind. Da der Folienballen auf seiner Oberfläche sehr lose Bereiche besitzt, welche nur in geringem Maße durch die Bindungen gehalten werden, wickelten sich die großflächigen Folien beim Starten des Bohrvorgangs um die Schneidflächen und bewirken ein abruptes Stoppen der Apparatur. Durch die wirkenden Kräfte sind Defekte an der Bohreinheit möglich. Die Umwicklungen des Bohrers können nur durch Freischneiden beseitigt werden. Das Ergebnis der maximalen Eindringtiefe lag bei 50 mm.



Abb. 33: Schlangen- und Forstnerbohrer.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass beide für eine Beprobung im Bereich der Folienfraktionen ungeeignet sind. Der ursprünglich erhoffte Späneaustrag ist für eine Beprobung im Bereich der recyclingfähigen Leichtverpackungen unzureichend, da keine klaren Korngrenzen zu erkennen sind. Eine händische Sortierung der einzelnen Fraktionen zur Kontrolle der prozentualen Anteile nach Produktspezifikationen ist nicht möglich. Harte Ballenmaterialien⁹³ können ggf. von den Bohrern zerspannt werden. Voraussetzung hierfür ist die Abwesenheit von Folienmaterial und eine möglichst hohe Verdichtung.

⁹³ Vgl. Anhang M: Bohrgruppen und Störstoffanteil der DSD-Fraktionen.

6.1.2 Fliesenbohrkrone

Beim Fliesenbohrkronenselbstbau, siehe Abb. 34, handelt es sich um eine Kombination aus einem 57 mm Stahlrohr mit einer Länge von 500 mm und einem Innendurchmesser von 51 mm, einer 53 mm großen Fliesenbohrkrone und einem Morsekegel MK2-B16. Alle Teile wurden miteinander verschweißt. Auf der Mantelfläche ist das Rohr mit einem Längsschnitt zur Bohrgutentnahme versehen. Mit dem Ziel die Stabilität des Bohrers zu gewährleisten, geschah dies mit 150 mm Abstand zum jeweiligen Ende. Durch das Drehen einer Auswurfplatte, die unter Einsatz eines Schraubgriffes das Auswerfen erleichtern sollte, wurde die Konstruktion fertiggestellt. Die Auswurfplatte wurde im Laufe der Bohrversuche aus dem Testbohrer entfernt, da die mit ihr ausgeübte Kraft nicht ausreichte, um den im Rohr vorliegenden Kern von durchschnittlich 250 mm bis 300 mm Länge auszuwerfen. Vorteilhaft ist, dass die Bohrkronen günstig zu erstehen und flächendeckend verfügbar ist. Wird ein entsprechendes Rohr mit einer Bohrkronenaufnahme angefertigt, kann die Fliesenbohrkrone zügig gewechselt werden.



Abb. 34: Selbstbau Fliesenbohrkrone mit Detailaufnahmen.

Die ersten Testläufe waren erfolgversprechend. Der Bohrer konnte in mehreren Durchgängen solide Kerne ausbohren. Das entstandene Bohrgut wies klar abgegrenzte, runde Strukturen auf. Für die Elemente wurde der Begriff „Patties“ eingeführt. Im beschriebenen Fall entsprechen diese in ihrer Größe dem Innendurchmesser des Bohrers. Eine händische Bestandteilanalyse erwies sich aufgrund der Korngrößen des Bohrgutes als sehr gut durchführbar. Durch die Schneid- und Reibwirkung der Fliesenbohrkrone entstehen Späne. Sie besitzen Korngrößen < 10 mm und setzen sich an den Schneidflächen der Fliesenbohrkrone fest. Infolgedessen ist die Schneidwirkung eingeschränkt und der Einsatz von mechanischen Reinigern wie bspw. Drahtbürsten notwendig. Bei der Nutzung dieser Schneidengeometrie wäre die Verwendung einer Abreinigungseinheit möglich.

6.1.3 Betonbohrkrone

Im Bauwesen werden Betonbohrkronen verwendet und bei der Durchführung von Bohrungen in Beton und Gestein eingesetzt. Ihr Aufbau unterscheidet sich im Hinblick auf den Fliesenbohrkronenselbstbau nur leicht. Die Länge einer handelsüblichen Betonbohrkrone beträgt maximal 450 mm. Als Schneiden sind rechteckförmige Zinnen an der Bohrkronenspitze befestigt. Durch Diamantbesatz sind diese so konstruiert, dass sie ein gutes Schneiden in Beton ermöglichen. Zur konstruktiven Verbesserung wurde die Betonbohrkrone mit einem Auswurfschlitz versehen und gleichzeitig noch eine Anpassung der Aufnahme der Bohrkrone auf einen MK2-B16 Kegeldorn durchgeführt. Da durch die vorgegebene Maximallänge von 450 mm nur ein begrenztes Eindringen in den Ballen möglich war, wurde in der Drehbank eine Distanzstange angefertigt und am Bohrer befestigt, wie in Abb. 35 dargestellt. Der Innendurchmesser betrug 45 mm bei einer Wandstärke von 2,5 mm.



Abb. 35: Selbstbau Betonbohrkrone.

Im Falle des vorliegenden Kunststoffmaterials des Folienballens ist der Schneidenaufbau unvorteilhaft. Die Betonbohrkrone reibt auf der Kunststoffoberfläche und die Schneidwirkung ist gering. Allerdings ist dadurch die Hitzeentwicklung um ein Vielfaches höher. Zwar wird durch die Verwendung einer derartigen Bohrkrone eine unkomplizierte und kostengünstige Beschaffung realisiert, jedoch überwiegen die negativen Aspekte. Durch den hohen Grad an Verschmelzungen⁹⁴ und die schlecht abgegrenzten Patties ist eine Nutzung dieser Bohrerart für den Einsatz an Folienballen nicht zu empfehlen.

⁹⁴ Vgl. Kapitel 6.2.

6.1.4 Zackenbohrerkonstruktion auf Grundlage der Versuche

Eines der Ziele der Ballenbeprobung ist u. a. die Durchführung einer schnellen Probenahme. Die Idee zum Zackenbohrer entstand im Rahmen dieser Dissertation und war notwendig, da auf dem Markt erhältliche Bohrkronen nicht die gewünschten Ergebnisse hinsichtlich Schneidleistung und geringer Erwärmung erreichen konnten. Eigene Erfahrungen aus dem Dreh- und Fräsbereich wurden auf die Aufgabenstellung übertragen. Dabei entstand der Plan, die Reibung der Rohrrinnen/-außenwände durch eine definierte Anordnung am Bohrkopf zu minimieren und die Schneidleistung zu steigern.

Der größte Einflussfaktor auf die Zeit zur Probenahme ist die Nutzung einer entsprechend optimierten Bohrtechnik. Die Schnelligkeit von Zerspanungsprozessen wird über der Hauptnutzungszeit t_h beschrieben.⁹⁵

$$t_h = \frac{L * i}{n_{Drehzahl} * f} \quad \text{Gl. 6-1}$$

Die Hauptnutzungszeit ist die Zeit, in der die Ballenbeprobungsmaschine ihre vorgesehene Aufgabe erfüllt. Bei der betrachteten Maschine ist dies der Bohrvorgang, nicht der Rückhub oder der Wechsel des Werkzeuges. Dafür wird der Vorschubweg L mit der Anzahl der Schnitte i multipliziert und dann durch die Drehzahl $n_{Drehzahl}$ und den Vorschub je Umdrehung f geteilt. Der Vorschub je Umdrehung f setzt sich aus dem Vorschub je (Schneidplatten)-Zahn f_z mal der Zähneanzahl z zusammen.

$$f = f_z * z \quad \text{Gl. 6-2}$$

Da die Hauptnutzungszeit stark von der verwendeten Drehzahl und dem Vorschub abhängt, sind beide Systeme aufeinander anzupassen. Für den mobilen Ballenbeprober wird das HILTI Diamant-Kernbohrsystem DD 160 eingesetzt. Diese Bohrmaschine hat drei Leerlaufdrehzahlen, 420 1/min, 700 1/min und 1570 1/min. Der Vorschub wird bei diesem System vom Nutzer per Hand eingebracht und ist daher als nicht konstant anzusehen. Bei einem automatisierten Vorschubsystem kann dagegen der Vorschub lastabhängig konstant gehalten werden, um ähnliche Hauptnutzungszeiten bei gleichem Vorschubweg zu erzielen.

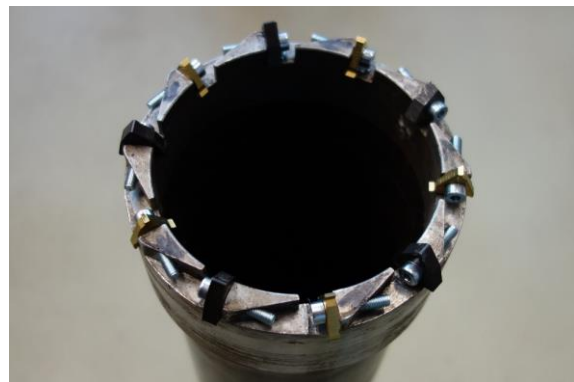


Abb. 36: Eingesetzte Zackenbohrer.

Links: \varnothing 60 mm; 6 Schneidplatten; Rechts: \varnothing 100 mm; 10 Schneidplatten.

⁹⁵ Vgl. Heinzler, M. et. al, (Tabellenbuch Metall, 1999), S. 266.

In Abb. 36 sind die bisher eingesetzten Zackenbohrer für die Ballenbeprobung, welche sich bei guten Schneideigenschaften als robust und wenig stör anfällig erwiesen haben, zu sehen. Speziell für den Einsatz bei der Beprobung von Kunststoffballen entstanden unter Verwendung von Zackenbohrern selten Umwicklungen der Bohrer oberfläche mit Kunststoffmaterialien. Bei Folienballen ist ferner eine Vorrichtung für die Ballenbeprobungsmaschine zu empfehlen, die den Bereich um das Bohrloch andrückt, wie in Anhang T.2: Fehlschläge bei Bohrungen und Lösungen aufgezeigt. Das Einziehen von Folien durch den Bohrer auf der Ballenoberfläche wird dadurch vermieden.

Entscheidend für die Zerspanung des Materials ist die Form der Platten und die Ausrichtung auf der Bohrkrone. Schneidplatten, die in Richtung des Umfangs ausgerichtet sind, besitzen eine niedrige Schneidwirkung. Als optimal hat sich eine Ausrichtung der Platten im 90° Winkel zum Umfang erwiesen, siehe Abb. 37. Werden dreieckförmige Schneidplatten verwendet, zerspanen diese das Material zum einen vor, neben und im Bohrkopf.

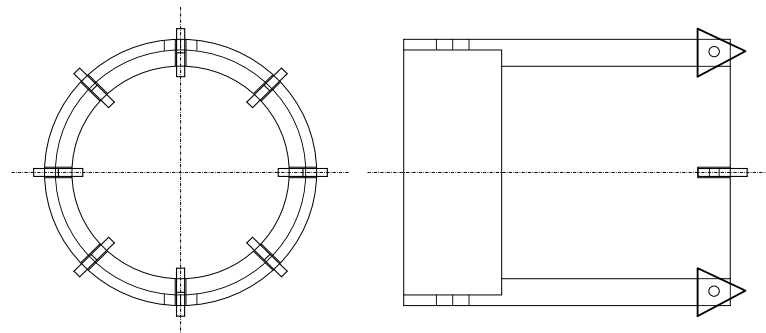


Abb. 37: Skizze Zackenbohrkrone mit acht dreieckförmigen Schneidplatten.

Dies reduziert die Reibung des gesamten Bohrkernbohrers erheblich, da dem Bohrkernbohrer-Gestänge mehr Platz im Bohrkanal zur Verfügung steht und der entstehende Bohrkern vom Durchmesser kleiner ist als der Innendurchmesser des Bohrkopfes bzw. des Bohrgestänges. Das zerspante Material verbleibt im entstehenden Bohrloch und im ausgebohrten Bohrkern. Die anfallende Menge hängt von der nutzbaren Fläche der Wendeschneidplatten und vom zu zerspanenden Material ab. Weitere Konstruktionen der Zackenbohrkrone bzw. des Zackenbohrers befinden sich in den Anhängen J bis L.

6.1.5 Test der neuen Konstruktion - Zackenbohrkrone

Als Grundlage diente ein 500 mm langes Rohr mit dem Außendurchmesser von 57 mm und einer Wandstärke von 3 mm. Darauf wurde mit Hilfe der institutseigenen Drehbank ein spezieller Aufsatz angefertigt. Am Ende des neuen Bohrkronenmodells ist ein Endstück angebracht und ein MK2-B16 Kegeldorn fixiert. Alle Teile wurden miteinander verschweißt. Der Innendurchmesser der Zackenbohrkrone beträgt 48 mm. Um den Auswurf der Bohrproben zu ermöglichen, ist ein Auswurfschlitz in den Bohrer geschnitten, wie in Abb. 38 zu sehen.



Abb. 38: Selbstbau Zackenbohrkrone.

In das Kopfstück wurden sechs Kerben eingebracht, in denen handelsübliche Hartmetallwendeschnidplatten Platz finden. Hartmetall wird verwendet, da es eine hohe Härte und Verschleißfestigkeit aufweist. Es handelt sich um Legierungen aus Metallkarbiden und einem Bindemetall. Stoffe aus denen Hartmetalle⁹⁶ hergestellt werden, sind Wolfram, Titan oder Tantal. Als Bindematerialien dienen Kobalt, Nickel oder Eisen. Wie aus Gl. 6-2 ersichtlich, fördert eine höhere Zähnezahl den Vorschub je Fräsumdrehung. Als vorteilhaft haben sich sechs Wendeschnidplatten erwiesen, die auf einem Umfang von ca. 200 mm verteilt sind. Bei der Durchführung der Bohrversuche bestätigten sich die gewünschten Eigenschaften. Die Schneidleistung an der Bohrkronenspitze war hoch. Ersichtlich wurde dies bei der Auswertung der Bohrproben. Es traten nur geringe Verschmelzungsbereiche auf. Dies ermöglicht eine einwandfreie Handsortierung nach Stoffgruppen. Vor dem Auslösen eines neuen Bohrvorgangs bzw. nach Beendigung einer Ballenbeprobung sind die Wendeschnidplatten auf Beschädigungen zu prüfen. Theoretisch kann mit abgebrochenen Wendeschnidplatten weitergebohrt werden, solange idealerweise noch zwei gegenüberliegende Schnidplatten einsatzbereit sind. Anzupassen ist in diesem Fall die Vorschubgeschwindigkeit. Mit weniger Schnidplatten auf dem gleichen Umfang muss mehr Vorschubkraft investiert werden, um in ähnlicher Zeit das Material zu zerspanen. Allerdings steigt dadurch die Temperatur, was zu vermeiden ist. Ein Vorschlag für den Bau eines Zackenbohrers mit wechselbaren Wendeschnidplatten ist im Anhang L: Zackenbohrkrone wartungsfähig erläutert. Mit dem Zackenbohrer in Abb. 36 rechts wurden bereits erfolgreich Feldversuche durchgeführt. Mit händischem Vorschub konnten sechs Vollkerne à 600 mm Länge aus einem Mischkunststoffballen mit hohem Störstoffanteil innerhalb von 24 Minuten herausgebohrt werden.

⁹⁶ Vgl. Durit Hartmetall GmbH, (Technologie und Wissen zum Thema Hartmetall, 2017), o. S.

6.2 Umgang mit Verschmelzungserscheinungen

Verschmelzungen zwischen den einzelnen Komponenten entstehen während des Bohrprozesses durch die Reibung der Schnittkante des Bohrkopfes oder/und der Kernbohrerinnenwand bzw. -außenwand an Materialien mit niedrigen Schmelztemperaturen. Die in den Leichtverpackungsabfällen anzutreffenden Kunststoffe wie Polystyrol und Polyethylen besitzen Schmelzpunkte unter 100 °C.⁹⁷ Durch das Aufschmelzen und anschließende Abkühlen entsteht ein zusammenhaltender Bohrkern, dessen Bestandteile nur sehr schwer voneinander zu trennen sind. Ferner bilden sich durch die Verschmelzung Mischzonen heraus (Vermischung von Kunststoff A mit Kunststoff B), welche für eine Analyse nicht mehr brauchbar sind. In den getätigten Versuchen musste auf die Analyse der in der erstarrten Schmelze gebundenen Kunststoffe verzichtet werden, da diese nicht sauber aus der Gesamtstruktur zu entfernen waren, siehe Anhang T.1: Volumenelemente und Patties.

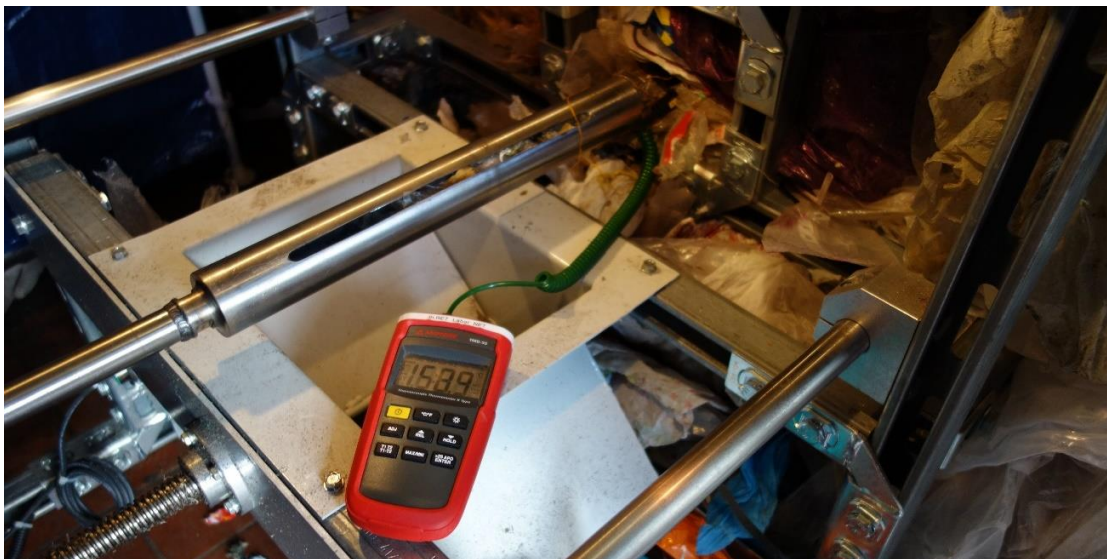


Abb. 39: Temperaturmessung an der Betonbohrkrone.

Gemessen wurde die Temperatur mit einem Aufsetzthermometer der Firma Amprobe Typ TMD-50, dargestellt in Abb. 39. Verbaut sind Typ-K-Thermoelemente mit $\pm 0,1 \%$ Grundgenauigkeit im Temperaturbereich zwischen -60 °C und 1372 °C . In Tab. 3 sind die beim Bohrprozess entstandenen Temperaturen der verwendeten Bohrer gegenübergestellt. Die Betonbohrkrone zeigte die höchste Temperatur an der Krone, dem Kern und am entstandenen Bohrloch. Der Messprozess fand immer an den gleichen Positionen statt, nach der Entnahme eines Bohrkerns mit einer Länge von 250 mm bis 300 mm und einem Durchmesser von rund 50 mm. Des Weiteren lag die Umgebungstemperatur bei 6 °C . Trotz der zügigen Messwertaufnahme konnte ein Wärmeübergang von der Krone zur Umgebung nicht verhindert werden. Die Kerntemperatur wurde unmittelbar nach dem Ausbohren des Bohrkerns erfasst und ist als realitätsnah zu betrachten.

⁹⁷ Vgl. Hellerich, W., (Werkstoffführer Kunststoffe, 2004), o. S.

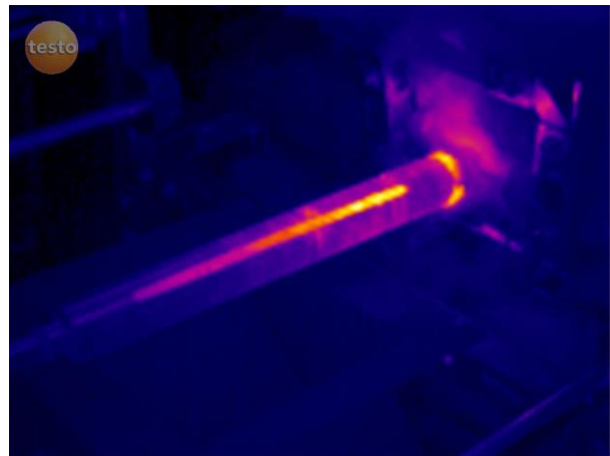
Tab. 3: Temperaturen an ausgewählten Bohrertypen – Kunststofffolien 310.

Bohrertyp	Ø 9 Krone [°C]	Ø 9 Kern [°C]	Ø 9 Bohrloch [°C]
Fliesenbohrkrone	54,4	45	39
Betonbohrkrone	80,5	82,55	57,3
Zackenbohrkrone	58,6	39,3	41,1

Dennoch ist festzustellen, dass die Temperatur beim Bohrprozess größer war. Eine Temperaturmessung während des Bohrvorgangs ist mit den vorhandenen Geräten nicht möglich gewesen. Neben den in Tab. 3 beprobten Folienballen der Produktspezifikation 310 wurde ein PET-Ballen der Produktspezifikation 328-2 beprobt. Die Temperaturverläufe sind im Anhang N: Daten Bohrversuche Bohrkronentemperatur PET-Ballen ausgewiesen.

6.2.1 Analyse Verschmelzung Betonbohrkrone

Durch die Konzeption der Betonbohrkrone für harte, mineralische Materialien ergeben sich Nachteile bei der Anwendung auf duktile Werkstoffe wie bspw. Kunststoff. Die Schneidengeometrie neigt zum Reiben des zu bearbeitenden Materials. Bei der Beprobung von Folienballen ist eine starke Hitzeentwicklung am Bohrer und im Bohrkern aufgetreten. Infolgedessen bildet sich ein stabiler Schlauch aus aufgeschmolzenem Kunststoff, in den sich andere, nicht aufgeschmolzene Inhaltstoffe eindrehen. Abb. 40 links zeigt eine typische Verschmelzung unter Verwendung des Betonkronenbohrers. Das aufgeschmolzene Material war im vorliegenden Fall LD-PE. Eine Kühlung des Bohrers mit Wasser ist wegen des hohen Ressourcen- und Reinigungsaufwandes nicht zu empfehlen.

**Abb. 40:** Verschmelzung und Temperaturmessung an Betonbohrkrone.

An den Bohrerschneiden und am Bohrkern sind die wärmsten Bereiche identifiziert, wie in der Thermografieaufnahme in Abb. 40 rechts ersichtlich. Zum Bild gibt es keine Temperaturskala, diese qualitativen Aufnahmen korrelieren mit den Werten in Tab. 3.

6.2.2 Analyse Verschmelzung Fliesenbohrkrone

Die höchsten Temperaturbereiche sind anhand der hellen Färbung in Abb. 41 erkennbar und befinden sich an der Bohrkronenspitze, an den überstehenden Bereichen der Schweißnaht sowie am Auswurfschlitz.

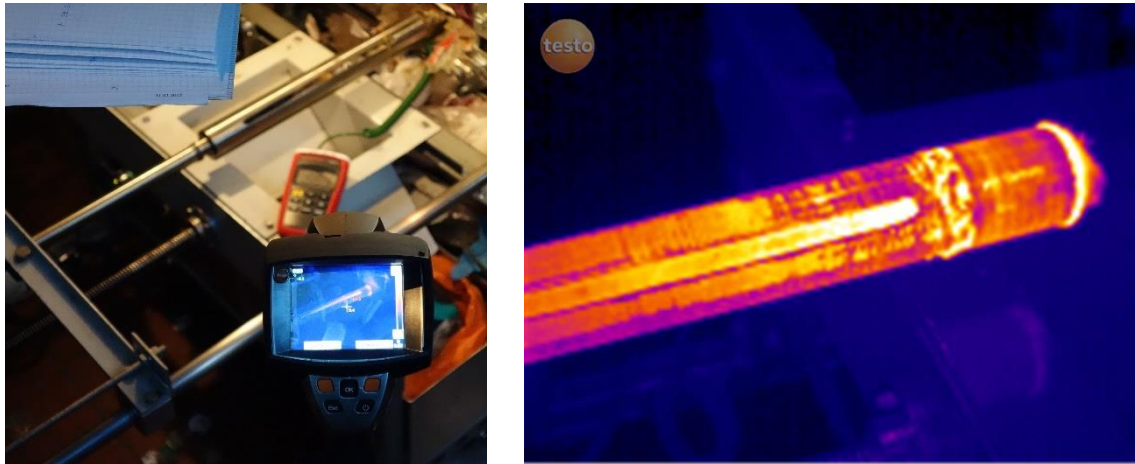


Abb. 41: Temperaturmessung an Fliesenbohrkrone.

Auf bis zu 57,5 °C können die Temperaturen ansteigen. Problematisch gestaltet sich die Hitzeentwicklung am Bohrer. Da einige Stoffe im Ballen eine geringe Schmelztemperatur besitzen, kommt es zu Verbindungen der Patties untereinander. Beispielsweise besitzt PE einen Schmelzbereich von 60 bis 70 °C.⁹⁸ Dabei leitet die Wandung des Bohrers die durch Reibung entstandene Hitze auf den Bohrkern weiter. Anschließend beginnen die Außenbereiche des Kerns zu zerfließen und letztendlich zu schmelzen. Durch das Vordringen in den Ballen schiebt sich der Bohrkern weiter in den Bohrer hinein und eine Außenhaut bildet sich. Sie besitzt Ähnlichkeit mit einer Hülle und hält die einzelnen Patties untereinander zusammen.

6.2.3 Analyse Verschmelzung Zackenbohrkrone

Die Temperaturmessung in Abb. 42 rechts zeigt, dass an der Bohrkronenspitze die höchsten Temperaturen auftreten. Aufgrund der Anordnung der Wendeschneidplatten ist der Bohrkern Durchmesser kleiner als der Innendurchmesser des Rohres. Des Weiteren ragen die Wendeschneidplatten über den Außenradius des Bohrkopfes hinaus. Der entstehende Bohrkanal ist größer als der Außendurchmesser des Bohrgestänges. Eine signifikante Erwärmung des Werkzeuges findet demnach lediglich an den Schneidplatten und dem vorderen Bohrkopfbereich statt. Der Bohrkopf ist mit einer dicken Wand ausgestattet, sodass die Wärmeübertragung gepuffert ist. Die entstehende Wärme verteilt sich infolge des geringeren Wärmeleitwiderstandes erst gleichmäßig auf den Bohrkopf und geht anschließend mit einer Verzögerung auf das Bohrgut über. Der Unterschied zwischen der Bohrkronentemperatur und der Bohrkerntemperatur betrug über die gesamte Testphase 10 °C - 20 °C.

⁹⁸ Vgl. Hellerich, W., (Werkstoffführer Kunststoffe, 2004), o. S.



Abb. 42: Beprobter Ballen und Temperaturmessung an Zackenbohrkrone.

Der entstehende Bohrkern, in Abb. 42 links, ist stabil und fällt nach dem Entfernen des Bohrers inklusive Bohrkern nicht in sich zusammen.

6.2.4 Einfluss auf das Sortier-/Analyseergebnis und Handlungsalternativen

In Abb. 43 ist der Vergleich einzelner Parameter von Zacken-, Fliesen- und Betonbohrkronen zu sehen. Grundlage für den Vergleich sind sechs, auf einer Höhe angelegte, Bohrungen pro Bohrkernbohrer. Die Drehzahl der Bohrkernbohrer wurde mit 1570 1/min und der Vorschub mit 5 mm/s gewählt. Anhand einer Sortieranalyse sind für bestimmte Stoffgruppen die Massenprozentage ermittelt. Bei den Folien handelte es sich um PE-Folien mit geschätzten Schmelzbereichen < 100 °C. Eine genaue Temperaturbestimmung über eine Einzelanalyse der Folien war zur Zeit der Probenahme technisch nicht möglich.

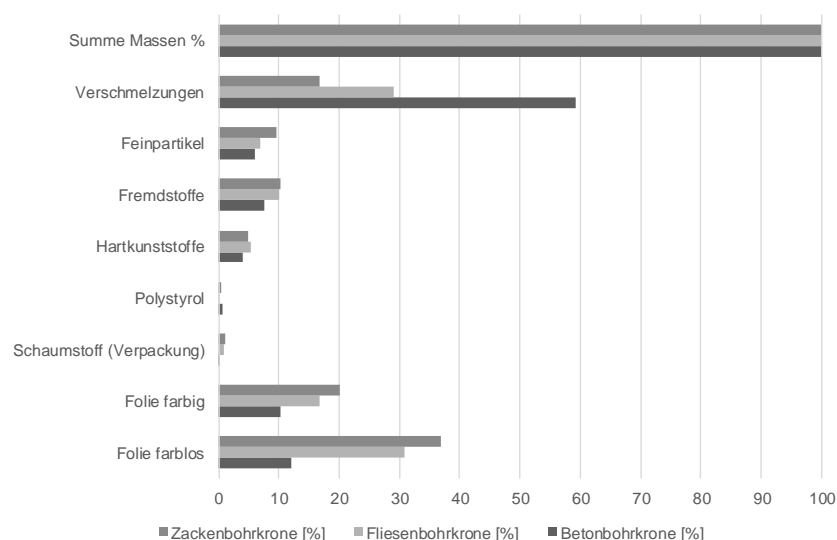


Abb. 43: Vergleich der Bohrer über Sortieranalyse.

Die Betonbohrkrone erzeugt die meisten Verschmelzungen, gefolgt von der Fliesenbohrkrone und dem Zackenbohrer. Bei der Detektion von Feinpartikeln, Fremdstoffen, Hart-

kunststoffen, Polystyrol und Schaumstoff haben die verwendeten Bohrer geringe Abweichungen. Bei den Parametern Folie farbig und Folie farblos treten große Unterschiede infolge der hohen Werte für Verschmelzungen auf, siehe Abb. 43.

Verschmelzungen des Bohrkerns können durch einen zu hoch gewählten Vorschub, wegen Zeitdruck, entstehen. Sollen dennoch die verschmolzenen Proben verwendet werden, ist die durch den Schmelzvorgang entstandene Hülle des Probenmaterials zu entfernen. Dies kann entweder per Messer oder einem dafür konstruierten Ausstanzwerkzeug erfolgen. Diese nicht beprobbare Menge muss kompensiert werden. Bei der „Ballenbeprobung ZG“ besteht die Forderung nach einer zehn Liter Probe. Tests bezüglich der zu kompensierenden Menge liegen nicht vor. Die Werte können aus Abb. 43 mit dem Parameter Verschmelzungen hochgerechnet werden.

Das Verfahren der „Ballenbeprobung ZG“ wurde beispielhaft an einem Folienballen der Produktspezifikation 310 und einem PET-Ballen der Produktspezifikation 328-2 erprobt. In den Anhängen O, P und Q sind ausgewählte Ergebnisse zusammengefasst ausgewiesen. Zur Überprüfung der Probe wurde auf eine Sortieranalyse zurückgegriffen, mit anschließender Massenbestimmung der Inhaltsstoffe nach den jeweiligen Produktspezifikationen.



Abb. 44: Sortieranalyse Produktspezifikation 310 und Auswahl Störstoffe.

Ergebnis ist u. a., dass der Folienballen 310 nicht den Produktspezifikationen entspricht. Der Störstoffanteil lag, über alle Bohrkernbohrer, zu hoch. Maximal 8 M.% Störstoffe sind erlaubt. Wie die Sortierung der Proben aus dem Folienballen ausgesehen hat und welche Störstoffe in ihr enthalten waren, ist in Abb. 44 beispielgebend dargestellt.

Der vorliegende PET-Ballen der Produktspezifikation 328-2 hat eine Dichte von $286,5 \text{ kg/m}^3$. Mit der Fliesenbohrkrone und Zackenbohrkrone wurden jeweils vier Bohrungen getätigt und im Durchschnitt $0,725 \text{ kg}$ bzw. $0,678 \text{ kg}$ Probenmasse pro Bohrvorgang bei einem Durchmesser von rund 50 mm sowie einer Volumenelementlänge von 300 mm herausgebohrt. Das Volumen des VE beträgt demnach $8,48 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Die durchschnittlich entnommene Probenmasse beträgt pro Volumenelement $0,7015 \text{ kg}$. Pro Volumenelement werden $0,2 \%$ der Grundmenge aus dem Ballen gebohrt. Der Anteil verschmolzener Kunststoffe ist unter Verwendung der Fliesenbohrkrone höher im Vergleich zum Zackenbohrer.

6.3 Bohrerkonzipierung und entstehende Zeitvorteile

Aus den Berechnungen und den Tests der Zackenbohrer ist festzustellen, dass mit steigender Anzahl an Schneidplatten die Dauer des Bohrvorgangs sinkt. Begrenzend ist der Durchmesser des Bohrers, da nicht unendlich viele Schneidplatten auf diesem anzuordnen sind. In Abb. 45 ist die Dauer eines Bohrvorgangs bei einem Vorschub je Schneidplatte (f_z) von 0,1 mm zu sehen. Innerhalb von 86 Sekunden kann ein Bohrkern mit einer Länge von 600 mm unter Verwendung des entworfenen Zackenbohrers mit dem Durchmesser von 100 mm, besetzt mit 10 Schneidplatten, aus dem Verbund gebohrt werden. Die Drehzahl ist mit 420 1/min gewählt.

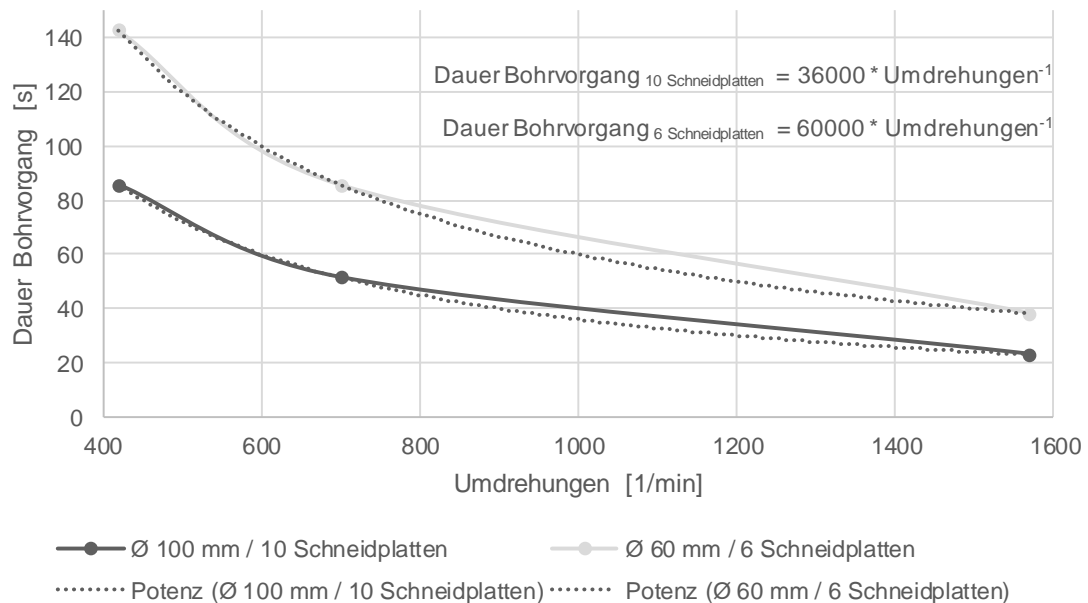


Abb. 45: Dauer Bohrvorgang Zackenbohrer.
 Kenndaten: $i=1$; $f_z=0,1$ mm, $l=600$ mm.

Bei gleicher Drehzahl benötigt der Zackenbohrer mit 6 Schneidplatten und einem Durchmesser von 60 mm für einen 600 mm langen Bohrkern 143 s. Aufgrund des geringeren Durchmessers kann die Drehzahl erhöht werden, sodass die Dauer des Bohrvorgangs bei 1570 1/min auf 38 s sinkt. Je höher die Drehzahl gewählt wird, umso kürzer ist die Dauer eines Bohrvorgangs, da die Schneidplatten schneller rotieren und mehr Material zerspant werden kann. Jedoch ist das Verhalten bei Störstoffkontakt unter Nutzung höherer Umdrehungszahlen kritisch. Die Wucht des Aufpralls der Schneidplatten auf harte Materialien ist größer und kann bei einem gleichzeitig hohen Vorschub zur Beschädigung der Schneidplatten führen.

6.3.1 Auswahl der Bohrer auf Basis von DSD-Produktspezifikationen

Anhand der in Tab. 4 aufgestellten Bohrgruppen kann ein Ballen über die Materialart eingruppiert werden. Die Eingruppierung erfolgte unter Berücksichtigung der durchgeführten Testläufe. Gleichwohl konnten nicht alle 31 Ballenfraktionen beprobt werden. Beispielsweise für die Materialart/Bohrgruppe Metall wurde zur Eingruppierung der Bohrer auf eigene Erfahrungen aus dem Dreh- und Fräsbereich zurückgegriffen.

Unter „Bohrgruppe I“ fallen alle harten Kunststoffe wie z. B. Kunststoffhohlkörper. Ein Gemisch aus Kunststoff und anderen Materialien, bspw. PPK aus LVP, wird in die „Bohrgruppe II“ eingestuft. Besteht das Gemisch aus harten und weichen Materialien, wie sie in der Fraktion gemischte PO-Artikel anzutreffen sind, ist dieses in die „Bohrgruppe III“ einzuordnen. Alle Ballen, die überwiegend aus metallischen Gegenständen bestehen, sind in „Bohrgruppe IV“ zu kategorisieren. Der Maschinenführer kann durch Betrachtung des Schemas sowie des Ballens den entsprechenden Bohrer auswählen. Er kann aber im Vorfeld keine Störstoffe sehen, die den Bohrer beschädigen können.

Tab. 4: Bohrer für Bohrgruppen auf Basis von Produktspezifikationen.

Bohrer \ Materialart / Bohrgruppe	Kunststoff hart	Gemisch / Kunststoff weich	Gemisch / Kunststoff weich und hart	Metall
	I	II	III	IV
Schlangenbohrer	x			x
Forstnerbohrer	x			
Fliesenbohrkrone	x		x	x
Betonbohrkrone	x			
Zackenbohrkrone	x	x	x	x

Der Schlangenbohrer kann für die „Bohrgruppen I und IV“ eingesetzt werden. Voraussetzung ist, dass keine Folien größer A4 im Ballen vorhanden sind, die sich um die Schneiden des Bohrers wickeln können. Der Forstnerbohrer ist lediglich für die „Bohrgruppe I“ geeignet. Ein unempfindliches Verhalten zeigt die Fliesenbohrkrone auf. Sie ist für die „Bohrgruppe I, III und IV“ geeignet. Durch die Besetzung der Bohrkrone mit Industriediamanten kann eine Vielzahl an Materialien durchtrennt werden. Kritisch ist die Erwärmung während des Schneidvorganges von Gemisch/Kunststoff weich anzusehen. Gerade bei diesen Fraktionen neigen die Materialien zum Aufschmelzen. Probleme mit der Erwärmung sind bei der Betonbohrkrone festgestellt worden. Diese schneidet alle Bohrgruppen bis auf Metall, ist aber lediglich für „Bohrgruppe I“ gut handelbar, da dort wenige, zum Verschmelzen neigende Materialien anzutreffen sind, siehe Abb. 43. Sehr gute Eigenschaften über alle Bohrgruppen besitzt die Zackenbohrkrone. Neben der guten Schneidleistung entwickelt die Bohrkrone eine geringe Wärme während des Schneidprozesses. Dies liegt vordergründig an der auf minimale Reibung ausgelegten Schneidengeometrie.

Für alle Produktspezifikationen liegen brauchbare Bohrer vor, die an ausgewählten Ballen der genannten Kategorien⁹⁹ getestet wurden. Wenn sich die Fraktionen in den kommenden Jahren ändern, können neue in das Schema eingeordnet werden. Es wird eine Vorgehensweise bereitgestellt, die auf Veränderungen reagieren und im Ausland Anwendung finden kann. Welcher Bohrer einzusetzen ist, hängt von den lokalen Gegebenheiten wie bspw. Reparaturmöglichkeit, Ersatzteilbeschaffung und Kostenaufwand ab.

6.3.2 Auswertungsmöglichkeiten

Je nach Beprobungsart, volumen- oder massenbasiert, ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der Auswertung. Wird das Verfahren der „Ballenbeprobung ZG“ angewandt, dann ist die Probe als Laborprobe für eine weitere Reduzierung hin zur Analysenprobe zu behandeln. Die Laborprobe ist nach Möglichkeit unter Verwendung der Pressbohrmethode zu reduzieren. Wird das Verfahren der „BP-Sortier ZG“ verwendet, ist eine massenbasierte Probenahme zu tätigen. Die zu untersuchende Probe sollte in Form von Bohrkernen vorliegen. In der Regel haften den Leichtverpackungsabfällen organische Bestandteile an. Wenn eine Handsortierung erfolgt, dann sind diese Anhaftungen nicht problematisch. Geschultes Personal kann die einzelnen Stoffgruppen meist optisch erkennen, für nichtklassifizierbare Bestandteile werden NIR-Handgeräte genutzt.¹⁰⁰ Um diese einzusetzen, muss bei dem jeweiligen Material ggf. die Oberfläche gereinigt werden. Soll eine NIR-Sortierung eingesetzt werden, ist ein Waschprozess der Probe für stark verunreinigte Materialien zu empfehlen. Eine Verunreinigung ist schnell durch Auseinandersortieren der Volumenelemente zu detektieren. Ferner ist die noch duldbare Verschmutzung auf der Probenoberfläche von der Sensibilität des verwendeten Nahinfrarot-Sortiergerätes abhängig. Der Waschprozess kann in einfachen Wannen via Hand oder in einer Waschmaschine ablaufen. Letzteres bietet den Vorteil, dass die Probe durch das Schleudern mechanisch getrocknet wird. Ebenfalls ermöglicht ein Waschverfahren die erste Trennung von Materialien, die schwimm- und sinkfähig sind. Kunststoffe mit hoher Dichte oder Störstoffe wie Metalle und Mineralik sinken zu Boden. Diese können zügig, nach einer Trocknung, ausgewogen und erfasst werden.

⁹⁹ Vgl. Anhang M: Bohrgruppen und Störstoffanteil der DSD-Fractionen.

¹⁰⁰ Vgl. Kapitel 3.1 Probenahme nach den Richtlinien des Grünen Punktes.

6.4 Versuche zur Ballenbeprobung mit dem Grünen Punkt

Der Versuch fand im Sommer 2017 in einem Qualitätssicherungs-Stützpunkt des Grünen Punktes in Thermalbad Wiesenbad OT Wiesa statt. Beprobt wurden zwei Ballen der Produktspezifikation „350 – Mischkunststoff“.¹⁰¹ Dabei wog der erste Ballen 794 kg und der zweite Ballen 821 kg. Laut Frachtpapieren umfasste die Lieferung 34 Ballen mit einem Gesamtgewicht von rund 21 t. Demnach ergibt sich ein berechnetes Gewicht von 618 kg pro Ballen. Die gemittelte Gewichtsdivergenz vom theoretischen und gemessenen Wert liegt bei rund 190 kg. Da die Ballen im Freien gelagert wurden, ist diese Differenz auf von außen zugeführte Flüssigkeit zurückzuführen. Ziel der Versuche war es, zufällig bestimmte Bohrkern aus dem Balleninneren zu bohren, diese untereinander zu vergleichen und Aussagen darüber zu treffen, wie viele Bohrungen für eine ausreichend repräsentative Analyse der Stoffzusammensetzung benötigt werden. Zur Probenahme wurde ein Zackenbohrer, besetzt mit zehn Wendeschneidplatten und 100 mm Durchmesser bei 600 mm Länge sowie ein Betonkernbohrer mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Länge von 400 mm, eingesetzt. Die Koordinaten wurden mittels Excel-Tool zufällig bestimmt und über die mobile Ballenbeprobungsmaschine händisch angefahren, siehe Abb. 46 links. Im Versuch 1, wie in Tab. 5 gegenübergestellt, sind drei Bohrungen pro Seite gesetzt und Vollkerne à 600 mm Länge entnommen worden. Die Zeiten wurden sowohl mit einer Stoppuhr als auch mit Videoaufzeichnungen festgehalten sowie gemittelt und gelten für die vorliegende Produktspezifikation „350 – Mischkunststoff“. Im Vorfeld wurden die Bohrer mit einem PET-Ballen der Produktspezifikation 328-2 an der Hochschule Nordhausen getestet. Dort erreichte der Betonkernbohrer eine Probenahmezeit von 25 Sekunden/100mm und der Zackenbohrer eine Probenahmezeit von 30 Sekunden/100mm.

Tab. 5: Versuchsplan gemeinsamer Versuch mit dem Grünen Punkt.

Versuchsnummer	Bohrerart	Anzahl Bohrungen pro Seite [Stk.]	Anzahl Bohrungen pro Versuch [Stk.]	Bohrkernlänge einzeln [mm]	Bohrkernlänge pro Versuch [mm]	Bohrerdurchmesser [mm]	Bohrerlänge [mm]	Probenahmezeit pro Bohrvorgang [s]	Probenahmezeit Gesamt [min]
1	Zackenbohrer	3	6	600	3600	100	600	240	24
	Betonkernbohrer		3	400	1200	60	400	120	6
2	Betonkernbohrer	3	3	100	300	60	400	30	1,5
3	Zackenbohrer	18	18	100	1800	100	600	40	12
	Betonkernbohrer	15	15	100	1500	60	400	30	7,5

Aus dem gleichen Ballen wurden im Versuch pro Seite 18 Bohrkern mit einer Länge von 100 mm entnommen. Es konnte lediglich eine Seite mit den 18 Bohrkernen beprobt werden, da der Ballen vorzeitig zur vergleichenden Analyse des am Ort ansässigen Sortierteams genutzt wurde. Am zweiten Ballen wurde der Versuch zwei durchgeführt und pro Seite drei Bohrkern mit einem Durchmesser von 60 mm und 100 mm Länge entnommen. Zusätzlich sind an einer Seite des Ballens die Versuche eins und zwei mit dem Betonkernbohrer durchgeführt worden. Die Bohrkernlänge beschränkte sich auf 300 mm im Versuch zwei und auf 1500 mm im Versuch drei.

¹⁰¹ Vgl. Anhang U: Versuchsprogramm Ballenbeprobung – Grüner Punkt und HSN.

Der Zackenbohrer erwies sich trotz des hohen Störstoffgehalts des Ballens als wenig störanfällig. Die gesamte Länge des Bohrers konnte genutzt werden, ohne dass die Bohrmaschine stehen geblieben ist. Teile < 100 mm lagen im Bohrer als Ganzes vor. Die Hitzeentwicklung hielt sich in Grenzen und lag unter 60 °C. Die herausgebohrten Kerne wiesen beim Zackenbohrer keine Verschmelzungen auf. Verschleiß an den Schneidplatten war nicht festzustellen. Zwei Schneidplatten lockerten sich, blieben aber im Verbund an dem Bohrer und konnten weiter schneiden. Ergänzend sollte die Schneidplattenaufnahme beim nächsten Bohrerbau überarbeitet werden, damit die Schneidkräfte flächig auf den Bohrer abgeleitet werden können. Dazu sind die Schneidplattenaufnahmen um 180° zu drehen, siehe Anhang L: Zackenbohrkrone wartungsfähig. Zudem sollte eine Schraubensicherung (Flüssigkleber bspw. Marke Loctite) verwendet werden. Der Betonkernbohrer verursachte Verschmelzungen, die zum Stillstand der Bohrmaschine während des Bohrvorgangs führten. Dadurch mussten mehrere Bohrkern e etappenweise aus dem Ballen gebohrt werden. Ferner war ein deutlicher Geruch nach verschmorten Kunststoffen festzustellen. Der Bohrer konnte mit der maximalen Umdrehungs- und Vorschubgeschwindigkeit in den Ballen getrieben werden. Diese war auf den ersten 200 mm nutzbar, danach erhöhte sich der Widerstand des Ballens deutlich und die Geschwindigkeiten der Maschine verringerten sich merklich.

Aufgrund des hohen Anteils an Textilien und Seilen bildeten sich Geflechte in den Kernbohrern. Diese lagen teilweise als massiver Körper, infolge zu hoher Hitzeeinwirkung, vor und waren sehr schwer zu trennen, siehe Abb. 46 rechts.

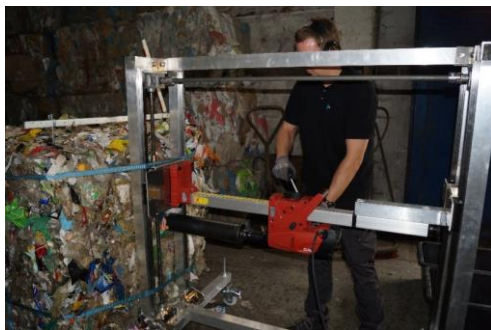


Abb. 46: Versuch zur Ballenbeprobung mit dem Grünen Punkt.

Links: mobile Ballenbeprobungsmaschine; Rechts: Geflecht aus Textilien.

Die Geflechte aus dem Zackenbohrer konnten gut und zügig auseinandersortiert werden. Da der Vergleich mit der Probenahme nach den Richtlinien des Grünen Punktes angestrebt ist, wurden die beiden Ballen im Anschluss an die beschriebenen Versuche von Mitarbeitern des Grünen Punktes sortiert.

Je Ballen wurde eine Seite mit einer großen Anzahl an Volumenelementen beprobt (18/15) und auf der gegenüberliegenden Seite eine Stichprobe mit je drei Volumenelementen entnommen. Die herausgebohrten Mengen betrugen jeweils rund 5 kg. Getätigte Auswertungen der Proben zeigen, dass die mit dem Verfahren der Ballenbeprobung erzielten Ergebnisse gleichwertig zu den Ergebnissen des Grünen Punktes sind. Allerdings liegt die Probenahmezeit deutlich unter der Vergleichszeit des Sortierteams (inkl. Sor-

tierzeit) in Höhe von 240 Minuten. Im Versuch mit der Ballenbeprobung lagen die gesamten Probenahmezeiten für die einzelnen Versuche zwischen 1,5 und 24 Minuten, je nach Bohrerart, -durchmesser, -länge sowie ohne Umspannzeit der Maschine, siehe Tab. 5. Für die händische Sortierung der herausgebohrten Proben (ca. 5 kg) benötigte eine Person 60 bis 90 Minuten, je nach Verschmelzungsgrad der Kunststoffe. Im konservativen Fall beträgt die Probenahmezeit inkl. Sortieranalyse rund 120 Minuten für 5 kg Probenmaterial.

Empfohlen wird folgende Vorgehensweise:

1. Entnahme einer Probenmenge pro Ballen in Höhe von 5 kg entweder durch
 - a) drei Proben mit einem/einer Bohrkerndurchmesser/-länge von 100/600 mm
oder
 - b) mindestens 15 Proben mit einem/einer Bohrkerndurchmesser/-länge von mindestens 60/100 mm.
2. Die Bohrerauswahl ist entsprechend der Inhaltsstoffe des Ballens zu treffen.

6.5 Steuer- und Erkennungstechnik als Bestandteil der repräsentativen Probenahme

Gleichbleibend zuverlässige Ergebnisse erzielen Computersysteme, da sie weder ermüden noch schwankende Leistungskurven aufzeigen. Um zu verstehen, welche Aktionen die Maschine ausführen soll, helfen Ablaufpläne. Diese unterstützen die Programmierung der Maschine als Simulation an einem Versuchsstand. Wenn die Software entsprechende Tests erfolgreich bestanden hat, dann kann diese auf den automatisierten Ballenbeprober gespielt werden. Die Software gilt unter Laborbedingungen als hinreichend genau überprüft. Der Fokus liegt auf den kritischen Bereichen:

- Erkennung der Ballendimensionen, Bindungen und Randbereiche,
- Generierung des Beprobungsplans in drei Dimensionen sowie
- Ausweisen der Startpunkte.

Im Rahmen der vom Autor betreuten Bachelorarbeit von Herrn Jan Reutershahn, B.Eng. wurden diese Punkte gesondert untersucht. Im Folgenden sind die Forschungsergebnisse aufbereitet beschrieben.

6.5.1 Konzeption Simulationsstand auf Basis einer SPS

Eine Speicherprogrammierte Steuerung (SPS) arbeitet nach dem Prinzip der Eingabe-Verarbeitung-Ausgabe. Die Eingabe erfolgt mittels digitaler sowie analoger Signale. Diese können beispielsweise durch Temperatursensoren, Lichtschranken oder Schalter gegeben werden. Im Falle der Ballenbeprobung dient das Touchdisplay zur Eingabe von Wertebereichen.

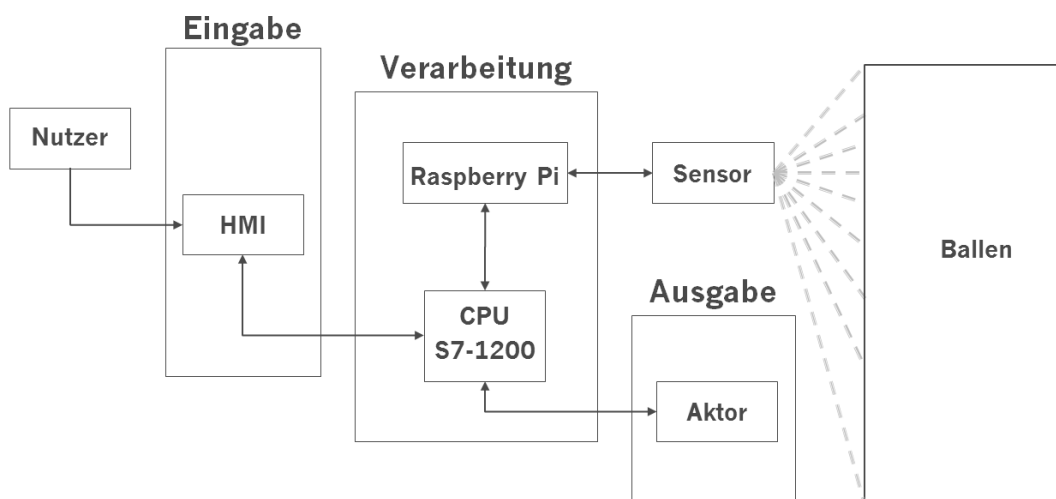


Abb. 47: Prinzip des aufgebauten Simulationsstandes.

Das Human-Machine-Interface (HMI) kommuniziert mit der angeschlossenen SPS. Die Verarbeitung wird unter Zuhilfenahme des erstellten Steuerungsprogramms ausgeführt. Eine weitere Verarbeitungsstufe ist das sogenannte Raspberry Pi, ein günstiger Einplatinencomputer. Angeschlossen an die SPS dient das Raspberry Pi als Erweiterung der SPS. Durch die Kommunikation mit einem Sensor, im Falle der Ballenbeprobung eine

Kamera, werden die Dimensionen der zu beprobenden Ballen erfasst und im weiteren Verlauf an die SPS gesendet. In der SPS wird anschließend ein vollständiger, zufälliger Beprobungsplan generiert und an die zuständige Ausgabeeinheit weitergeleitet. Der in Abb. 47 eingezeichnete Aktor ist bei der Ballenbeprobung eine Bohrmaschine auf einer in drei Dimensionen verfahrbaren Achse. Des Weiteren führt die Steuerung die Bohrer-Achseneinheit zu den berechneten Bohrpunkten und steuert den Vorschub. Hierbei werden die Fahrwege und Bewegungen auf dem HMI simuliert.

6.5.2 Optische Erkennungsmöglichkeiten für Ränder und Bindungen

Die optische Ballenerkennung wird benötigt, damit der Benutzer den Ballen nicht händisch abmessen, Daten der Bindungen und Ränder notieren und diese in die Software der SPS eingeben muss. Dadurch werden frühzeitig menschliche Fehlerquellen eliminiert.

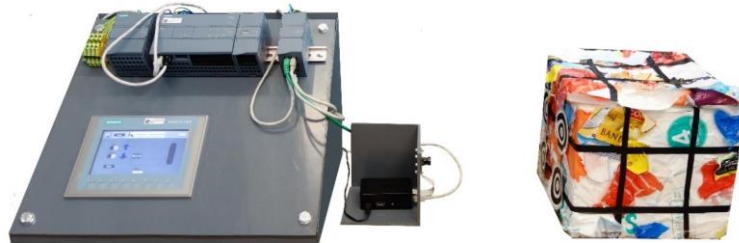


Abb. 48: Simulationsstand mit Raspberry Pi und Modellballen mit Markern.

Unter Einsatz von Markern¹⁰², einer Kamera und dem Raspberry Pi werden dem Benutzer die meisten Aufgaben abgenommen. Dieser muss lediglich einen vorgeschriebenen Abstand zwischen Kamera und Ballen einhalten. Die Marker sind zur Erkennung an jeder Überschneidung der Bindungen zu stecken, siehe Abb. 48 rechts. Für jede einzelne Bindung werden zwei Erkennungsmarker benötigt, um eine Geradengleichung¹⁰³ aufzustellen. Nach diesen Arbeitsschritten erfolgt, durch die Betätigung zweier Taster am Display und das Eingeben der Anzahl der Bindungen, der Start der optischen Ballenerkennung. Das Programm ermittelt für jede Aufnahme die genaue Position der Marker. Die erkannten Daten werden anschließend automatisch an die SPS übermittelt. Anhand von Geradengleichungen wird der Verlauf der Bindungen an der Oberfläche des Ballens abgebildet. Die zufällig generierten Bohrpunkte (Koordinaten von Breite x_i und Höhe y_i) werden auf ihre Lage an der Ballenoberfläche überprüft. Überschneidungen oder Nichteinhalten des festgelegten Abstandes mit der Bindung und bereits abgelegten Punkten sowie Punkten im Stegbereich werden verworfen und neu generiert. Der Vorgang endet, wenn die Anzahl an benötigten Bohrelementen erreicht ist. Im folgenden Abschnitt wird der Datenaustausch zwischen Raspberry Pi und der SPS erläutert.¹⁰⁴ Jeder Ballen besitzt mehrere Bindungen. Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten die Position der Bindungen zu erkennen. Hierzu ist eine kompatible Kamera mit dem Raspberry Pi zu verbinden.

¹⁰² Geometrische Muster, die als Markierung für ausgewählte Bereiche dienen.

¹⁰³ Vgl. Kapitel 5.3.2.

¹⁰⁴ Vgl. Reutershahn, J., (Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines steuerungstechnischen Prüfstandes für die Ballenbeprobung, 2016) S. 21.

Insgesamt wurden drei mögliche Programme getestet. Die erste Möglichkeit bietet die Linienerkennung, siehe Abb. 49. Bindungen können an einigen Stellen durch Stoffe verdeckt und damit nicht sichtbar sein. Aus diesem Grund ist dieses Vorgehen zum jetzigen Zeitpunkt nicht realisierbar. Eine zweite Möglichkeit ist die Mustererkennung.

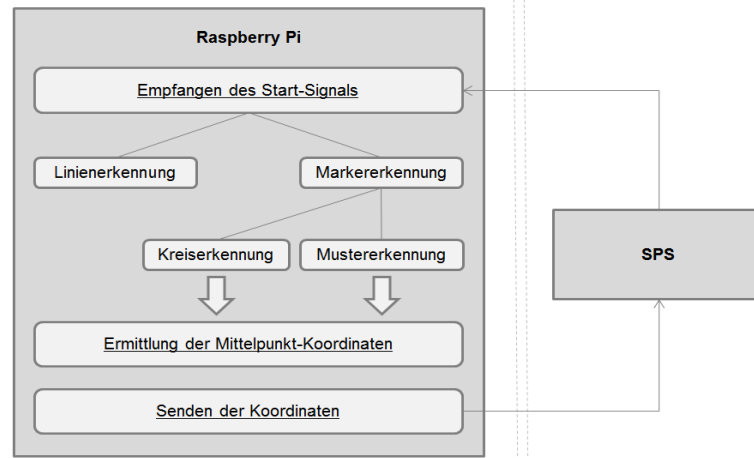


Abb. 49: Optische Erkennungsarten im Raspberry Pi.

Quelle: Reutershahn, J., (Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines steuerungstechnischen Prüfstandes für die Ballenbeprobung, 2016), S. 22.

Das Programm sucht nach einem vorher eingepflegten Muster. Dieses muss ein eindeutiges Muster darstellen, welches in der ausgewählten Art nicht auf der Oberfläche eines Ballens existiert. Um die Erkennung zu verbessern wurden drei Varianten entwickelt. Die erste Variante dient zur Umwandlung des erstellten Fotos in Schwarz und Weiß. Eine zweite Variante dient dazu, ein abgespeichertes Muster auszuwählen und nach diesem auf dem aktuellen Foto zu suchen. Mit der Kreiserkennung ist eine dritte Möglichkeit entwickelt worden. Das Programm ähnelt der Mustererkennung. Zusätzlich ist dieses in der Lage, den genauen Mittelpunkt des Kreises anzugeben. Der Nutzer der automatisierten Ballenbeprobung muss lediglich, siehe Abb. 50, die Kreise bzw. Marker setzen. Es muss darauf geachtet werden, dass alle Marker die gleiche Größe und einen identischen Farbcode besitzen.



Abb. 50: Muster- und Kreiserkennung der Ballenbindungen.

Quelle: Reutershahn, J., (Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines steuerungstechnischen Prüfstandes für die Ballenbeprobung, 2016), S. 24, S. 59.

Um die Suche zu verbessern, müssen die variablen Parameter auf die verwendeten Marker eingestellt werden. Zu beachten ist der vorgegebene Abstand zwischen Kamera

und Ballen. Nach erfolgreichem Auswerten des Bildes werden die Mittelpunkte der Marker in einem Array (Datenfeld) gespeichert. Im nächsten Schritt gibt das Programm das verwendete Bild aus. Diesmal sind alle gefundenen Kreise eingefügt und grün markiert, wie im obenstehenden rechten Bild. Abschließend werden die erhaltenen Werte aus dem Array herausgelesen und in das daran angehängte Programm geschrieben. Die in der Abb. 50 rechts gesteckten Marker konnten alle in zahlreichen Probeläufen vom Programm gefunden werden. Bei der Farbwahl war es von Vorteil, einen weißen Rand mit schwarzer Füllung zu verwenden, um die Kontraste optimal hervorzuheben. Deutliche Schwächen sind bei der Linien- und Kreiserkennung im Hinblick auf die Ballenbeprobung ersichtlich. Letztendlich wurde die Mustererkennung für die weitere Verwendung gewählt.

6.5.3 Ablauf der automatisierten Probenahme und Visualisierung

Basis des beschriebenen Ablaufs sind die Programmablaufpläne im Anhang R: Programm für automatisierte Beprobung. Diese sind unter Einsatz des Simulationsstandes erprobt und können, unabhängig von der steuerungstechnischen Plattform, übertragen werden. Letzteres muss im Kontext der physisch vorhandenen Maschine geschehen, sodass dafür ein Grundlagenwissen im Bereich der Mechatronik zu empfehlen ist. In Abb. 51 ist das Konzept eines automatisierten Ballenbeprobers mit drehbarer Ballenauflage dargestellt. Diese Maschine verfügt über drei fahrbare Achsen, eine Bohrmaschine und einen Bohrer mit automatischem Bohrkernauswurf inkl. zwei Auffangbehältern.

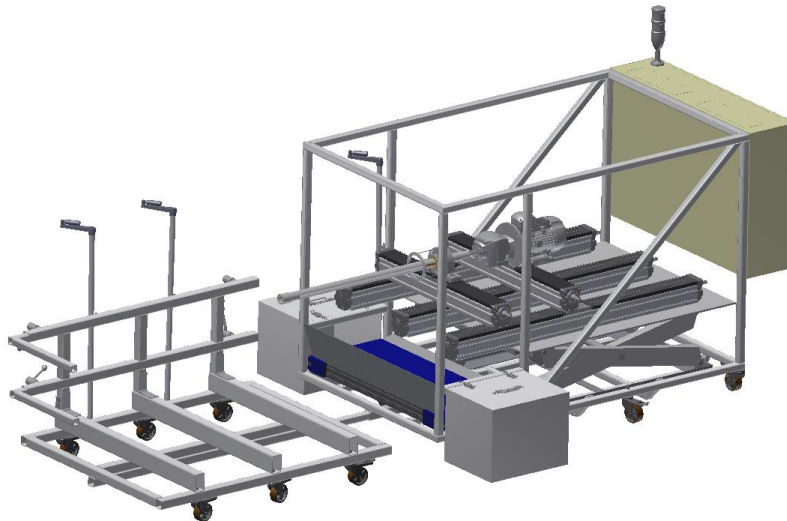


Abb. 51: Konzept automatisierter Ballenbeprober mit drehbarer Ballenauflage.

Quelle: Glimm, A., (Entwicklung einer Maschine zur gezielten Volumenentnahme aus Wertstoffballen, 2015), S. 10.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde dazu eine Bachelorarbeit betreut, in der diese Maschine konzipiert und statisch ausgelegt wurde.¹⁰⁵ Das im weiteren Verlauf vorge-

¹⁰⁵ Vgl. Glimm, A., (Entwicklung einer Maschine zur gezielten Volumenentnahme aus Wertstoffballen, 2015), S. 11 ff.

stellte Programm basiert auf dem Hardwarekonzept des oben zu sehenden Ballenbeprobbers. Des Weiteren ist die für das Programm benötigte Benutzeroberfläche im Anhang S: Visualisierung der automatisierten Beprobung abgebildet.

Im ersten Schritt muss die Anlage unter Spannung gesetzt werden. Dazu darf der Not-Aus-Schalter nicht betätigt sein. Anschließend ist eine Auswahl zwischen Automatik- und Handbetrieb zu treffen.

Während des Handbetriebs sind zunächst die Linearachsen freizugeben. Danach kann die x-, y- und z-Achse über die Motoransteuerung in positiver oder negativer Richtung bewegt werden. Voraussetzung hierfür ist die jeweilige Position im Toleranzbereich der Achse. Ist dies der Fall, kann bei Bedarf der Bohrer gestartet werden. Der Handbetrieb ist in Situationen einzusetzen, die nicht im routinemäßigen Bohrbetrieb auftreten. Bleibt bspw. der Bohrer im Ballen stecken, kann durch ein gezieltes Vor- und Zurückfahren der z-Achse die vorliegende Blockade gelöst und die Achsen auf die Ausgangspositionen gefahren werden. Für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen müssen die vorliegenden beweglichen Teile einzeln fahrbar konzipiert sein. Diese Maßnahmen sind stets über den Not-Aus-Schalter gesichert, um die Unfallgefahr zu reduzieren.

Wird der Automatikbetrieb gewählt, ist zunächst der Ballen in Position zu bringen, die Erkennungsmarker zu setzen und die Anzahl der Bindungen einzupflegen. Anschließend startet die optische Ballenerkennung. Sind alle Marker erkannt, wird die Anzahl der Bohrpunkte auf Grundlage des Zufallssystems bestimmt und deren Lage hin zu den Rand-/Sicherheitsbereichen sowie zu anderen Bohrpunkten verglichen. Sollten dabei Konflikte auftreten, sind diese durch Neuberechnungen der Bohrpunkte zu lösen. Wenn alle Parameter zufriedenstellend berechnet sind, kann die Bohrung durchgeführt werden.

Die optische Ballenerkennung erzeugt über die am Raspberry Pi angeschlossene Kamera ein Foto, welches auf das hinterlegte Muster der Erkennungsmarker untersucht wird. Werden Muster erkannt, gibt das Programm die Koordinaten sowie die Anzahl der Erkennungsmarker weiter. Stimmt die Anzahl der optisch erkannten Muster mit der vom Benutzer eingegebenen Anzahl überein, werden die Mittelpunkte der Muster berechnet und anschließend zur SPS weitergegeben. Sollte die Anzahl nicht übereinstimmen, wird eine Fehlermeldung an die SPS gesendet.

Zur Berechnung der Anzahl der Bohrungen ergeben sich für den Nutzer zwei Lösungswege. Die Daten sind manuell oder benutzerdefiniert einzupflegen. Benutzerdefiniert heißt: Sind die Ballendimensionen bekannt, können die Parameter Breite, Höhe, Tiefe, Verdichtungsgrad, Bohrspezifikationen und Probenvolumen in Datensätze abgespeichert sowie bei Bedarf aufgerufen werden. Ist dies der Fall, wird anschließend das Ballenvolumen, der Mindestabstand und die Anzahl der Bohrpunkte berechnet. Sind die Dimensionen des vorliegenden Ballens unbekannt, müssen diese manuell eingepflegt werden. Anschließend besteht die Möglichkeit, diese als Datensatz im Rechensystem zu hinterlegen. Dies beschleunigt weitere Probenahmen auf Basis des gleichen Ballens.

Ist die Anzahl der Bohrpunkte definiert, kann die Berechnung der zufallsgenerierten Koordinaten erfolgen. Diese werden mit den berechneten Koordinaten für die Bindungen

anhand der in Kapitel 5.3 aufgestellten Geradengleichungen über die Ermittlung des Lot-Abstandes verglichen. Ebenfalls wird die Lage der Bohrpunkte zueinander untersucht. Die Koordinaten legt das System in Arrays ab, in denen diese sortiert werden. Hierbei erfolgt die Sortierung auf Basis der x-Koordinaten, vom kleinsten Wert hin zum größten. Wenn die Sortierung beendet ist, erhält der Nutzer eine Rückmeldung. Es besteht infolgedessen die Möglichkeit mit den Daten fortzufahren oder eine weitere Berechnung mit Sortierung anzustoßen.

Abschließend wird die Bohrung durchgeführt. Diese findet in zwei Phasen statt.¹⁰⁶ Als Erstes werden alle Elemente vor dem betreffenden Volumenelement herausgebohrt und verworfen, anschließend wird das eigentliche Volumenelement entnommen. Hierfür müssen die Linearachsen einmalig freigegeben und referenziert werden. Dies ist nötig, da die Achsen theoretisch überall im physisch begrenzten Koordinatenraum stehen können. Sobald der zweistufige Bohrprozess abgeschlossen ist, wird die Anzahl der benötigten Bohrungen um eins reduziert und der nächste Bohrpunkt angefahren.

Für alle Schritte ist eine Prozessüberwachung mit Ereignisspeicherung zu empfehlen. Dadurch kann im Falle eines Ausstiegs der Maschine der Fehler maximal eingegrenzt und zügig beseitigt werden. Ferner ist diese Ereignisspeicherung für die Störstoffkontrolle wichtig. Kann der Bohrer wegen eines Störstoffes nicht weiterbohren, ist dies zu vermerken. Tritt dieser Fehler mehr als drei Mal bei unterschiedlichen Koordinaten auf, ist eine Rückweisung des Ballens in Erwägung zu ziehen. Voraussetzung ist der ordnungsgemäße Zustand der Bohr-/Maschinenteknik. Je nach betrieblichem Ablauf kann parallel ein Fehlerprotokoll hinterlegt oder ausgedruckt werden.

Eine Auslegung der Steuerung sollte idealerweise an den Bedürfnissen der Qualitätsprüfer ausgerichtet sein. Das Verfahren gibt dazu die nötigen Vorschläge. Ergänzungen können und sollen weiter gepflegt werden, damit die Maschinenteknik auf neu zu beprobende Fraktionen und Probenahmethode angepasst werden kann.

Je nach Produktspezifikation, Bohrertyp, -durchmesser, -länge sowie Entnahmekarte können die benötigten Volumenelemente innerhalb einer Zeitspanne von 6 bis 12 Minuten aus einem Ballen entnommen werden.¹⁰⁷ Die händische Probenahme dauerte bei den begleiteten Sortierversuchen 180 bis 240 Minuten. Darin ist die Zeit für die Sortierung in die einzelnen Fraktionen enthalten. Die Zeit für die händische Sortieranalyse der über die Ballenbeprobung gewonnenen Probe liegt zwischen 60 und 90 Minuten, je nach Verschmelzungsgrad. Wird ein NIR-Analysegerät benutzt, sind Analysezeiten zwischen 5 und 10 Minuten in Abhängigkeit vom Verschmelzungsgrad erreichbar.

¹⁰⁶ Hier wurde auf die Programmierung der Vollkernentnahme verzichtet. Eine Implementierung in das bestehende Programm ist ohne Weiteres möglich.

¹⁰⁷ Vgl. Kapitel 6.4.

7 Fazit mit Ausblick

Die Sortierung der heterogenen Abfälle ist wegen der unterschiedlichen Stoffzusammensetzung und Beschaffenheit nicht sortenrein und bedarf eines hohen, anlagentechnischen Aufwandes. Jener Aufwand muss am Ende der Sortierung in qualitativ hochwertigen Sortierfraktionen münden. Derzeit gibt es nach den Produktspezifikationen des Grünen Punktes 31 Fraktionen, die zu Transportzwecken in Ballen gepresst werden können.

Im betrieblichen Ablauf werden für den Verdichtungs Vorgang unterschiedliche Pressen verwendet. Diese verdichten die sortierten Fraktionen um das zwei- bis 42-fache der Ausgangsschüttdichte. Jede sortierte Fraktion weist eine unterschiedliche Schüttdichte auf. Daraus folgt, dass die gepressten Ballen bei gleichem Raumvolumen divergente Dichten innehaben. Diese liegen gegenwärtig zwischen 174 kg/m^3 und 1152 kg/m^3 , gemessen über alle Sortierfraktionen der Leichtverpackungen. Die durchschnittliche Dichte beträgt bei 409 kg/m^3 . Hierbei besitzen Ballen durchschnittliche Abmessungen von $1085 \text{ mm} \times 1026 \text{ mm} \times 1167 \text{ mm}$, bei einer Masse von 531 kg .

Recycler haben ein Interesse an Ballen, die den Produktspezifikationen entsprechen. Um dies zu gewährleisten, führen Recyclingfirmen eine Qualitätssicherung durch oder beauftragen entsprechende Unternehmen. Stand der Technik ist eine willkürliche Auswahl von zu beprobenden Ballen. Ebenfalls willkürlich ist die händische Entnahme einer massenbasierten Probe zwischen 25 kg und 100 kg , je nach Prüfvorschrift bzw. mit der Prüfung beauftragten Firma. Der Aufwand für die Probenahme ist sehr hoch, da die Fraktion händisch sortiert und ggf. für eine nachfolgende Laboranalyse weiter aufbereitet werden muss.

Bei der im Rahmen dieser Dissertation entwickelten Ballenbeprobung ist die Dichte bzw. das Ballenvolumen in die Probenahme einberechnet. Es sind vier sich unterscheidende Verfahren aufgestellt, welche Proben mit Bohrkernbohrern aus dem Ballen ziehen. Bei der „Ballenbeprobung ZG“ wird eine zehn Liter Laborprobe je Ballen, mit einer entsprechenden Anzahl an zufälligen Bohrungen über das verfügbare Raumvolumen, entnommen. Diese kann anschließend gemäß der DIN 54385:2016-08 Pressbohrmethode reduziert und dadurch eine entsprechende Analysenprobe hergestellt werden. Das hier erörterte Verfahren wurde auf die LAGA PN 98 und die DIN 19698-2:2016-12 Integrale Charakterisierung übertragen. Diese rücken die Grundmenge des Abfalls in den Vordergrund und variieren die Anzahl der zu beprobenden Ballen („BP-PN 98 ZG“) bzw. die Probenanzahl („BP-Integral ZG“). Zudem wurde das Verfahren der „Ballenbeprobung ZG“ auf die Standards des „Grünen Punktes“ übertragen. Dabei wird die Anzahl der Proben in Abhängigkeit von der Ballendichte und der Probenmenge variiert, „BP-Sortier ZG“ genannt. Auf Grundlage einer Lieferung von 20 Ballen können unter Verwendung der „Ballenbeprobung ZG“ fünf Volumenelemente und bei Nutzung der „BP Sortier ZG“ 14 Volumenelemente aus einem Ballen gebohrt werden. Bei beiden Probenahmen wird ein Bohrer mit einem Durchmesser von 60 mm verwendet. Die Volumenelemente besitzen eine Länge von 100 mm .

Jede Probe der Ballenbeprobung wird unter Zuhilfenahme von angepassten Bohrkernbohrern aus dem Ballen gezogen. Es können einzelne Bohrkernabschnitte à 100 mm Länge oder ganze Bohrkern aus dem Ballen entnommen werden. Mittels Temperaturmessungen konnten konstruktive Mängel bestehender Kernbohrer aufgezeigt und ein neuer Bohrer, der Zackenkernbohrer bzw. die Zackenbohrkrone, entwickelt werden. Insgesamt wurden sechs Bohrer unterschiedlicher Bauart untersucht und drei näher betrachtet. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Zackenbohrkrone ist konstruktiv so gestaltet, dass sie während des Bohrprozesses ein Minimum an Reibung erzeugt und dabei optimale Schneideigenschaften besitzt. Dazu sind mindestens sechs dreieckige Wendeschneidplatten im 90° Winkel zum Umfang zu setzen. Favorisiert werden Bohrer mit den Durchmessern 60 mm und 100 mm sowie einer Länge von 600 mm.

Das Zufallsentnahmesystem ist nicht nur für den Ballen, sondern ebenfalls für die Auswahl der Ballen auf einem LKW, Container oder Schiff sowie in einem Ballenlager entwickelt. Dabei ist die Vorgehensweise ähnlich. Empfohlen wird die Verwendung des im Microsoft Programm Excel vorhandenen Zufallsgenerators. Diese Zufallszahlen dienen zur Ermittlung der Bohrpunkte auf und ggf. im Ballen. Bei einer Vollkernentnahme ist eine Ermittlung der Zufallszahlen in x- und y-Richtung ausreichend. Sollen einzelne Volumenelemente entnommen werden, sind die Zufallszahlen für die z-Richtung zu generieren. Es muss die Lage der Bohrpunkte berücksichtigt werden, da die Randbereiche um den Ballen ($s_{\text{Rand}}=100 \text{ mm}$) und die Sicherheitsbereiche um die Bohrungen ($s_{\text{Bohrung}}=10 \text{ mm}$) sowie die Bindungen ($s_{\text{Bindung}}=10 \text{ mm}$) nicht beprobungsfähig sind.

Für die Ballenbeprobung stehen zwei verschiedene Maschinenkonzepte zur Auswahl. Ist eine standorttreue Probenahme vorgesehen, bspw. an Kanalballenpressen, empfiehlt sich der Einsatz einer automatisierten Probenahmeapparatur. Für einen solchen Apparat liegen bereits Konstruktionszeichnungen vor, die im Rahmen der Betreuungsleistung von zwei Bachelorthesen für die Dissertation erstellt wurden. Ausstattbar ist dieser mit einer optischen Ballenerkennung, sodass automatisiert das Probefeld erfasst, Nebenbedingungen eingepflegt und beprobt werden können. Der Aufwand an Mitarbeitern ist unter Einsatz einer automatisierten Maschine sehr gering. Bei Ortsveränderungen, wie es bei Firmen die mit der Qualitätssicherung beauftragt sind der Fall ist, kann ein mobiler Ballenbeprober eingesetzt werden. Dieser hat drei Achsen, die per Hand verfahrbar sind und ist mit einer Bohrmaschine ausgerüstet. Zum Betreiben dieser Maschine sind zwei Mitarbeiter einzusetzen. Ein Mitarbeiter übt den Bohrvorgang aus, der andere tauscht den Bohrer und entnimmt das Volumenelement. Dieses System ist gemeinsam mit dem Grünen Punkt im Sommer 2017 erfolgreich getestet worden.

In der vorliegenden Dissertation wurde der Stand der Technik in der Qualitätssicherung von Ballen im Kontext mit aktuellen Vorgehensweisen bei der Sortierung und dem Recycling von Leichtverpackungen aufgezeigt. Die theoretische Ausarbeitung ist dabei von zahlreichen Interviews und Vor-Ort-Besuchen unterstützt. Des Weiteren sind die physikalischen Parameter von 31 Ballenfraktionen aufgenommen und in eine Bilddatenbank im Anhang E geordnet. Erst auf Grundlage dessen konnten die teils hohen Abweichungen im spezifischen Gewicht der Ballen detektiert werden. Der Einfluss einer Erhöhung

der Grundmenge auf die zur Beprobung notwendige Anzahl an Ballen lässt sich über das Verfahren „BP-PN 98 ZG“ gut nachvollziehen. Die entwickelten Verfahren decken die Anforderungen an eine Probenahme im betrieblichen Ablauf auf Seiten der Sortierer und der Recycler gut ab. Das Bohrwerkzeug ist robust und auf eine zügige Entnahme von Volumenelementen ausgelegt. Dabei ist stets auf die Einhaltung einer Temperaturschwelle im Bohrkern um 40 °C geachtet worden.


Zum Ende der Projektbearbeitung wurde eine Untersuchung mit dem Grünen Punkt durchgeführt. Die benötigte Probenmenge von 5 kg kann in maximal 12 Minuten aus einem Ballen entnommen werden. Dazu sind pro Ballen entweder drei Proben mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Länge von 600 mm oder mindestens 15 Proben mit einem Durchmesser von 60 mm und einer Länge von 100 mm zu entnehmen. Die Angaben beziehen sich auf die Produktspezifikation „350 – Mischkunststoff“, welche einen sehr hohen Störstoffgehalt besitzt. PET-Ballen der Produktspezifikation 328-2 konnten zügiger mit der Bohrtechnik beprobt werden. In der Dissertation wurde die mechanische und thermische Belastung der Bohrwerkzeuge nicht modelliert. Diese Thematik kann als Basis für weitere wissenschaftliche Arbeiten dienen. Speziell die Wärmeverteilung im Bohrer und der Wärmeübergang auf das Bohrgut sollte betrachtet werden. In der vorliegenden Arbeit wurden bereits erste Vorarbeiten durch praktische Temperaturmessungen an den betreffenden Komponenten getätigt. Als Grund für die Temperaturerhöhung infolge des Bohrprozesses ist der Aufbau des Bohrkopfes sowie der Schneiden detektiert. Mit einer zu erstellenden Bohrsimulation kann der Zackenbohrer weiter optimiert und auf die gängigen Ballenfraktionen angepasst werden. Die Modellierung und Simulation von Bohrern kann Kosten sparen, denn die Bohreranfertigung durch eine Firma ist sehr kostenintensiv. Dabei können die aufgestellten Materialarten/Bohrgruppen eine Simulationserstellung hinsichtlich des Bohrgutes unterstützen. Studien zu den Wärmeübergangswiderständen der Inhaltsstoffe sollten zur Bearbeitung dieser Thematik noch durchgeführt werden. Gerade in Kombination mit dem teilweise hohen Wassergehalt in den Ballen ist diese Fragestellung zukünftig in wissenschaftlichen Arbeiten zu untersuchen.

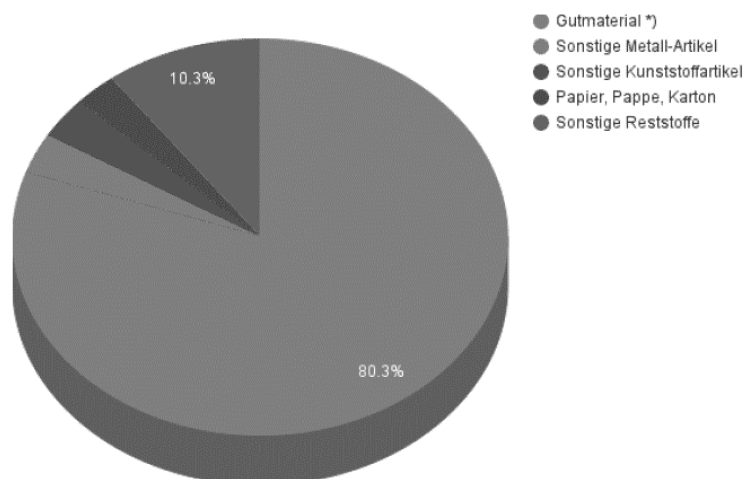
Mit der Entwicklung des Verfahrens der zufallsgenerierten Ballenbeprobung ist eine grundlegende Vorgehensweise hin zur Normung geschaffen worden. In Absprache mit Anwendern aus der Praxis ist eine Norm zu entwickeln, die alle praxisrelevanten Parameter berücksichtigt.

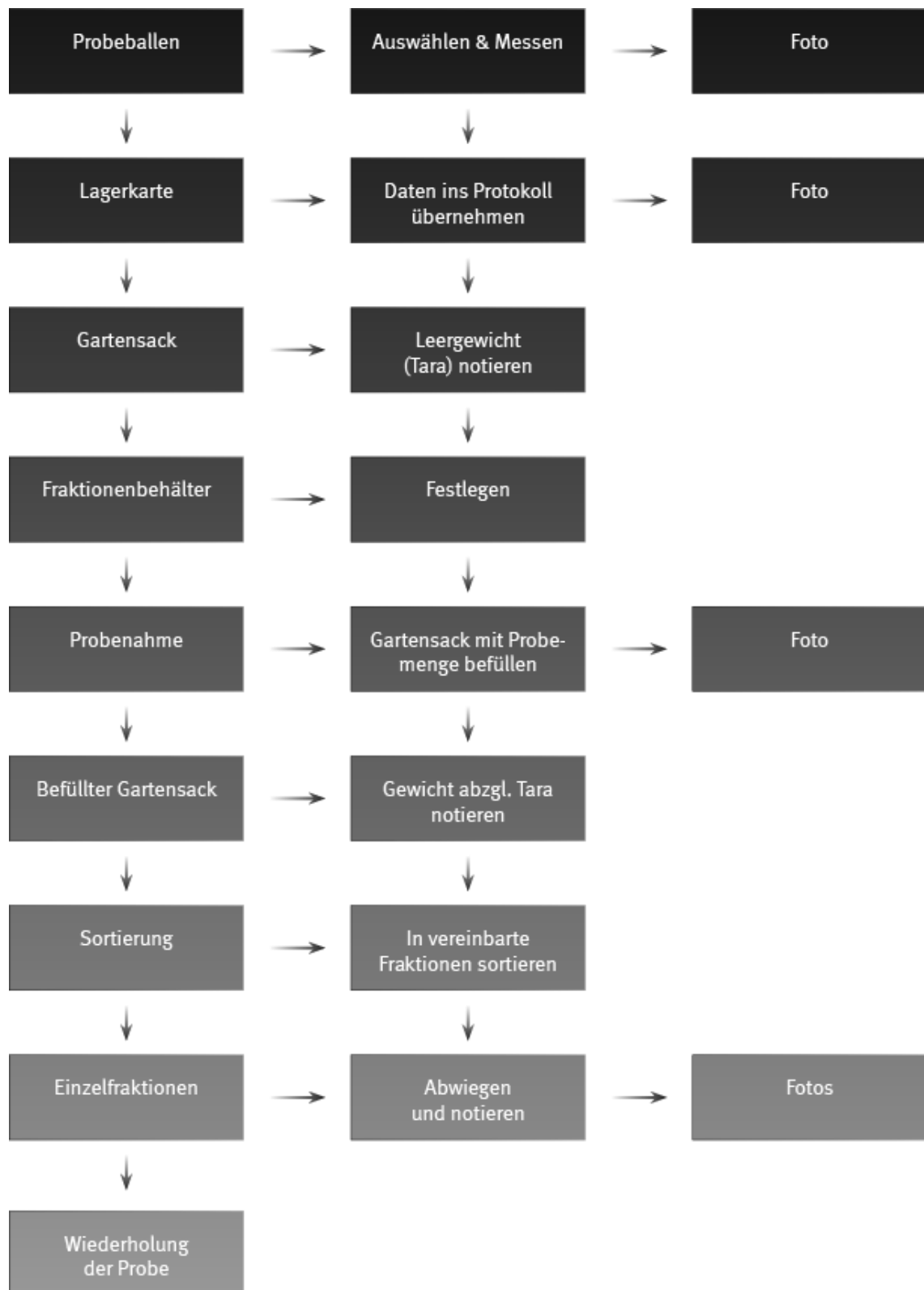
Anhang A: Daten Ballendimensionen

Fraktion	Fraktions-Nr.	Breite [mm]	Höhe [mm]	Tiefe [mm]	Gewicht [kg]	Dichte [kg/m³]	Schüttdichte unverpresst [kg/m³]	Verdichtung [-]
Kunststoff-Folien 310 - 1	310 - 1	1400	1100	1200	712	385	13	30
Kunststoff-Folien 310	310	1000	1000	1100	344	313	13	24
Kunststoff-Folien 310	310	1100	800	1200	543	514	13	40
Kunststoff-Folien 310	310	1100	1100	1200	709	488	13	38
Gemischte Kunststoff-Flaschen	320	1100	800	1000	290	330	30	11
Polyolefin-Flaschen	321	1200	1200	1400	550	273	65	4
Kunststoff-Hohlkörper	322	1000	1000	1100	214	195	30	6
Kunststoff-Hohlkörper	322	1100	1100	1200	488	336	30	11
Gemischte PO-Artikel (MPO)	323	1000	1000	1100	310	282	65	4
Polypropylen	324	1200	1100	1100	486	335	55	6
Polypropylen	324	1100	1100	1200	512	353	55	6
Polypropylen Plus	324-1	1400	1150	1100	515	291	55	5
Polypropylen Plus	324-1	1100	800	1200	344	326	55	6
Polypropylen Plus	324-1	1100	1100	1200	512	353	55	6
PET-Flaschen, transparent	325	1100	1100	1100	350	263	30	9
PET-Flaschen, transparent	325	1100	1200	1400	541	293	30	10
PET-Flaschen, transparent	325	1100	1100	1200	550	379	30	13
Misch-PET 90/10	328-1	1100	1100	1200	550	379	30	13
Misch-PET 70/30	328-2	1000	750	1200	270	300	30	10
Misch-PET 70/30	328-2	1100	1200	1400	541	293	30	10
Misch-PET 70/30	328-2	1100	1100	1200	550	379	30	13
Misch-PET 50/50	328-3	1000	1000	1100	247	225	30	7
Misch-PET 50/50	328-3	1100	1100	1200	600	413	30	14
Polyethylen	329	1200	1100	1000	437	331	70	5
Polyethylen	329	1100	1100	1100	524	394	70	6
Becher	330	1200	1200	1400	580	288	30	10
Polystyrol	331	1100	1100	1200	636	438	30	15
Expandiertes Polystyrol	340	1100	1100	1200	253	174	15	12
Mischkunststoffe	350	1000	1000	1100	391	355	65	5
Mischkunststoffe	350	1100	1100	1100	450	338	65	5
Mischkunststoffe	350	1000	750	1100	390	473	65	7
Mischkunststoffe	350	1100	1200	1400	695	376	65	6
Mischkunststoffe	350	1100	1100	1200	760	523	65	8
Formstabile Kunststoffe 1	351-1	1000	750	1000	280	373	70	5
Formstabile Kunststoffe 2	351-2	1000	750	1000	280	373	70	5
Formstabile Kunststoffe 3	351-3	1000	750	1000	280	373	70	5
Formstabile Kunststoffe 4	351-4	1000	750	1000	280	373	70	5
Mischkunststoffe neu	352	1000	1000	1100	391	355	60	6
Mischkunststoffe neu	352	1100	1100	1200	760	523	60	9
Mischkunststoffe neu	352	1100	800	1000	350	398	60	7
Mischkunststoff	352-1	1100	1100	1200	760	523	60	9
MPO Beiprodukt (KEG)	361	1000	1000	1100	422	384	70	5
Ersatzbrennstoff-Vorprodukt	365	1100	1100	1200	794	547	300	2
Weißblech	410	500	500	500	50	400	125	3
Weißblech	410	500	500	500	43	344	125	3
Weißblech	410	500	500	300	80	1067	125	9
Weißblech	410	500	500	500	112	896	125	7
Weißblech-SPEZ-2011	412	450	450	300	70	1152	125	9
Aluminium-Spez-2011	420	1000	1000	1100	558	507	75	7
Aluminium-Spez-2012	420	1100	1100	1200	968	667	75	9
Flüssigkeitskartons	510	1000	1000	1100	615	559	60	9
Flüssigkeitskartons	510	1100	1100	1200	983	677	60	11
PPK aus LVP	550	1000	1000	1100	555	505	60	8
PPK aus LVP	550	1100	1200	1400	1026	555	60	9
PPK aus LVP	550	1100	1100	1200	900	620	60	10
LVP-Sortierreste Mittel & Überkorn	831	1000	750	1200	485	539	100	5
LVP-Sortierreste Mittel & Überkorn	831	1000	1000	1100	422	384	100	4
LVP-Sortierreste Mittel & Überkorn	831	1100	1200	1400	900	487	100	5
LVP-Sortierreste Mittel & Überkorn	831	1100	1100	1100	800	601	100	6
Durchschnittliche Abmessung [mm]		1035	981	1103				
Durchschnittliche Abmessung ohne Weißblech [mm]		1085	1026	1167				
Durchschnittliches Gewicht [kg]					492			
Durchschnittliches Gewicht ohne Weißblech für Berechnungen [kg]					531			
Durchschnittliche Dichte anhand Summe Dichten [kg/m³]						433		
Durchschnittliche Dichte ohne Weißblech anhand Summe Dichten [kg/m³]						402		
Durchschnittliche Dichte [kg/m³]						379		
Durchschnittliche Dichte ohne Weißblech für Berechnungen [kg/m³]						409		
Durchschnittliche Schüttdichte unverpresstes Material ohne Weißblech[kg/m³]							57	
Durchschnittliche Verdichtung ohne Weißblech [-]								10
Durchschnittliche Verdichtung ohne Weißblech für Berechnung [-]								7
Firma		Farbcode	Schüttdichten: Quelle DSD					
			Eigenschaft	Wert	Einheit			
Firma A			Folie	10 bis 15	kg/m³			
Firma B			PP	50 bis 60	kg/m³			
Firma C			HDPE	60 bis 80	kg/m³			
Firma D			PET	30	kg/m³			
Firma E			EBS-Vorpr	200 bis 500	kg/m³			
Firma F			PO	65	kg/m³			
Firma G			PS	30	kg/m³			
Firma H			Exp-PS	15	kg/m³			
Die Firmen sind dem Autor bekannt und können nach Rücksprache mit dem Autor und der betreffenden Firma auf Anfrage genannt werden.			Aluminium	50 bis 100	kg/m³			
			Weißblech	100 bis 150	kg/m³			
			PPK	35 bis 80	kg/m³			
			LVP Gesamt	24 bis 40	kg/m³			

Anhang B: Ablauf Sortieranalyse GBP Quality GmbH

 GBP Quality GmbH		Sortieranalyse		Ausg.: 07.12.2015 Rev: 1
		310-1 Folie		
Kunde				
Disponummer		Eingangsdatum	02.05.2016	
Lieferant		Sortierung Ballen	2	
Abholstelle		Nr. Ballenanhänger	Nein	
Artikelbezeichnung	310-1	Anzahl Ballen	0	
Netto Gewicht STICHPROBE des Ballens	35,67	kg		
Gutmaterial *)	> 92 %	28,53	kg	80,26%
PP-Folien (enthalten in *)		0,10	kg	
Metallische und mineralische Störstoffe mit einem Stückgewicht > 100g und Kartuschen für Dichtmassen	0,0 %	0,00	kg	0,00%
Sonstige Metall-Artikel	≤ 0,5 %	1,18	kg	3,31%
Papier, Pappe, Karton	≤ 1,0 %	0,98	kg	2,75%
Sonstige Kunststoffartikel **)	≤ 4,0 %	0,00	kg	3,42%
PET Flaschen und Trays (enthalten in **)		0,00	kg	
Kunststoffe hart (enthalten in **)		1,22	kg	
Sonstige Reststoffe	≤ 4,0 %	3,66	kg	10,26%
<small>Glas, Papier, Pappe, Karton, PPK- Verbundmaterialien (z.B. Flüssigkeitskartons) Aluminium bedampfte Kunststoffe, Fremdmaterialien (z.B. Gummi, Steine, Holz, Textilien) kompostierbare Abfälle (u.a. Lebensmittel, Gartenabfälle)</small>				
GESAMT - Störstoffe	max.8,0 %	7,04	kg	19,74%
Ergebnis entspricht der Spezifikation		JA		NEIN





Anhang C: Probenahmeprotokoll COREPLA Italien

Report di Controllo qualità per contestazione del prodotto selezionato

Report n° [redacted] Prodotto: SELE FIL/S Codice: 24611
Imballaggi flessibili di plastica

Centro ispezione n° [redacted]

Dati di produzione balle Etichette ☒ NO ☐ NO
Data di produzione Turno [redacted]
Formulario: [redacted] Data Formulario: [redacted]
Società: [redacted] Luogo Analisi: [redacted] Data analisi: [redacted]
Ora di inizio analisi [redacted] Ora di fine analisi [redacted]

Analisi a seguito del reclamo n° [redacted]
del [redacted]

		Valore	Formula	Risultato	Limite
	Peso Netto del campione	kg 56,45	A+B+C		min 50 kg
i o n i e s t r	A PLASTICA (altri manufatti e imballaggi in plastica, altri materiali)	g 4200	(valore $\times 0,1 / N$)	% 7,44	6,00 % max
	B INERT_META (inerti e metalli ferrosi e non e altri materiali)	g 1150	(valore $\times 0,1 / N$)	% 2,03	2,50 % max
	B1 di cui METALLI	g 300	(valore $\times 0,1 / N$)	% 0,53	1,50 % max (*)
	B2 (*) MET_150	g 0	n° pezzi		assenti
C	Frazione Conforme (non impurità o frazione estranea)	g 51100	(valore $\times 0,1 / N$)	% 90,52	

Risultato: ☐ Conforme ☒ NON conforme

N.B.: CPL non selezionabili (CPL < 0,5L, CPL > 5L, CPL PET opachi, CPL non di PE/PET, tanichette per olio motore, CPL con etichetta coprente in plastica) vanno conteggiati nella voce A (PLASTICA)
N.B.: Sconti e/o sfridi della produzione di imballaggi e comunque imballaggi non utilizzati (preconsumo) sono considerati Frazione Estranea

Eventuali note:
MATERIALE MISCEATO CON MULETTO A PINZE. CONTESTIAMO LA MISCELAZIONE
L'ANALISI È STATA FATTA SU UNA BAZZA CON DATA PRODUZIONE
LA PRIMA NON FACEVA PARTE DEL
CARICO CONTESTATO. COME DA REPORT FOTOGRAFICO IL MISCEATO
MATERIALE SI PRESENTAVA ANCORA IMBALLATO (CON PEZZI DI BAZZA)
L'ANALISTA PRIMA DI PROCEDERE CON L'ANALISI HA
FATTO PRENDERE UNA PARTE DI MATERIALE CON IL MULETTO
E LO HA FATTO METTERE SOPRA IL CUMULO SCELTO O SI È
PROCEDUTO CON L'ANALISI MENTRE SOTTO IL MATERIALE NON ERA APERTO
È OVVIO CHE CON QUESTO SISTEMA (MULETTO) IL MATERIALE PICCOLO
SIA COME MENTRE IL FILM RIMANGA IMPACCHETTATO E SOTTO È NON V
ANALIZZ

SEGUENTE NOTA SCRITTA IN TERTIO A QUANTO SOPRA RIPORTATO





COREPLA Redatto da: D. Palma





Anhang D: Ausgewählte Kanalballenpressen





Lfd Nr.	Hersteller	Typ	Spezifische Presskraft [N/cm ²]	Bindungstyp	n _{Bin}	B [mm]	H [mm]	T [mm]	V _{Bal} [m ³]	m _{BalPET} [kg]	ρ _{PETBallen} [kg/m ³]	ρ _{PETØ} [kg/m ³]	Verdichtungsgrad [-]
1	HSM GmbH & Co. KG	A	124	horizontal	5	1100	1200	1100	1,45	1250	861	30	29
2	Europress -Anlagen und Maschinenbau GmbH	B	181	vertikal	5	1100	750	1100	0,91	1500	1653	30	55
3	Presona Deutschland GmbH	C	114	vertikal	5	1100	720	1100	0,87	1100	1263	30	42
4	Abba Pressen Vertriebs GmbH & Co. KG	D	76	horizontal / kreuz	5	1100	1080	1100	1,31	850	650	30	22
5	Domitron AG	E	203	horizontal	5	1100	1100	1100	1,33	1800	1352	30	45
6	Macpresse Europa – MAC Service GmbH	F	162	horizontal	5	1100	1100	1100	1,33	1300	977	30	33
7	Presto GmbH & Co. KG	G	49	horizontal	4	1100	750	1100	0,91	400	441	30	15
8	DIXI – Maschinenfabrik Bermatingen GmbH & Co. KG	H	68	horizontal	3	1100	800	1100	0,97	400	413	30	14
9	BOA Recycling GmbH	I	167	vertikal / kreuz	5	1200	1100	1100	1,45	1400	964	30	32
10	Avermann Maschinenfabrik GmbH & Co. KG	J	141	vertikal / kreuz	5	1100	1100	1100	1,33	1200	902	30	30





Anhang E: Ballenlexikon (eigene Fotoaufnahmen)




Sortierfraktion	Fraktions-Nr.	Aussehen
Kunststoff-Folien	310-1	
Kunststoff-Folien	310	
Gemischte Kunststoff-Flaschen	320	



Polyolefin-Flaschen	321	
Kunststoff-Hohlkörper	322	
Gemischte PO-Artikel (MPO)	323	
Polypropylen	324	





Polypropylen Plus	324-1	
PET-Flaschen, transparent	325	
Misch-PET 90/10	328-1	
Misch-PET 70/30	328-2	

Misch-PET 50/50	328-3	
Polyethylen	329	
Becher	330	
Polystyrol	331	

Expandiertes Polystyrol	340	
Mischkunststoffe	350	
Formstabile Kunststoffe 1	351-1	
Formstabile Kunststoffe 2	351-2	

Formstabile Kunststoffe 3	351-3	
Formstabile Kunststoffe 4	351-4	
Mischkunststoffe neu	352	
Mischkunststoff	352-1	

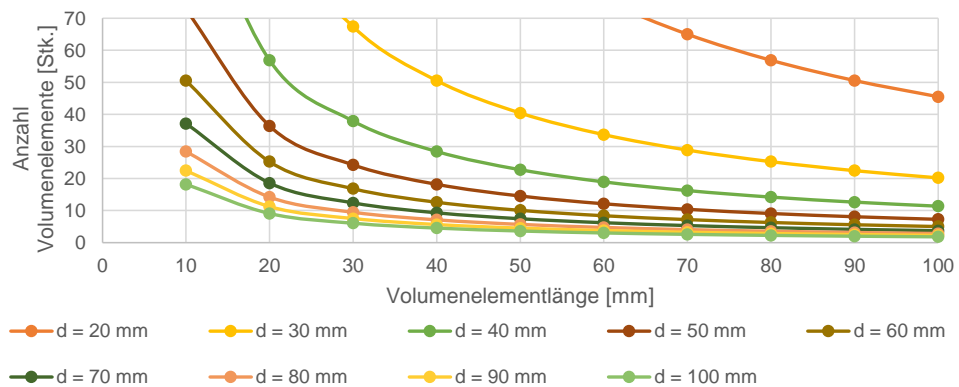
MPO Beiprodukt (KEG)	361	
Ersatzbrennstoff-Vorprodukt	365	
Weißblech	410	
Weißblech-SPEZ-2011	412	

Aluminium-Spez-2012	420	
Flüssigkeitskartons	510	
PPK aus LVP	550	
LVP-Sortierreste Mittel & Überkorn	831	

Anhang F: Berechnungen Ballenbeprobung ZG

d Bohrerdurchmesser [mm]	l Volumenelementlänge [mm]	k_{Verdichtung} ϕ Verdichtungsgrad [-]	V_{Laborprobe} Benötigte Laboratoriumsprobe unverdichtet [L]	V_{VE} Volumen Volumenelement [m ³]	n_{BP-ZG} Anzahl Volumenelemente pro Ballen [Stk.]
20	10	7	10	3,14E-03	455
20	20	7	10	6,28E-03	227
20	30	7	10	9,42E-03	152
20	40	7	10	1,26E-02	114
20	50	7	10	1,57E-02	91
20	60	7	10	1,88E-02	76
20	70	7	10	2,20E-02	65
20	80	7	10	2,51E-02	57
20	90	7	10	2,83E-02	51
20	100	7	10	3,14E-02	45
30	10	7	10	7,07E-03	202
30	20	7	10	1,41E-02	101
30	30	7	10	2,12E-02	67
30	40	7	10	2,83E-02	51
30	50	7	10	3,53E-02	40
30	60	7	10	4,24E-02	34
30	70	7	10	4,95E-02	29
30	80	7	10	5,65E-02	25
30	90	7	10	6,36E-02	22
30	100	7	10	7,07E-02	20
40	10	7	10	1,26E-02	114
40	20	7	10	2,51E-02	57
40	30	7	10	3,77E-02	38
40	40	7	10	5,03E-02	28
40	50	7	10	6,28E-02	23
40	60	7	10	7,54E-02	19
40	70	7	10	8,80E-02	16
40	80	7	10	1,01E-01	14
40	90	7	10	1,13E-01	13
40	100	7	10	1,26E-01	11
50	10	7	10	1,96E-02	73
50	20	7	10	3,93E-02	36
50	30	7	10	5,89E-02	24
50	40	7	10	7,85E-02	18
50	50	7	10	9,82E-02	15
50	60	7	10	1,18E-01	12
50	70	7	10	1,37E-01	10
50	80	7	10	1,57E-01	9
50	90	7	10	1,77E-01	8
50	100	7	10	1,96E-01	7
60	10	7	10	2,83E-02	51
60	20	7	10	5,65E-02	25
60	30	7	10	8,48E-02	17
60	40	7	10	1,13E-01	13
60	50	7	10	1,41E-01	10
60	60	7	10	1,70E-01	8
60	70	7	10	1,98E-01	7
60	80	7	10	2,26E-01	6
60	90	7	10	2,54E-01	6
60	100	7	10	2,83E-01	5

70	10	7	10	3,85E-02	37
70	20	7	10	7,70E-02	19
70	30	7	10	1,15E-01	12
70	40	7	10	1,54E-01	9
70	50	7	10	1,92E-01	7
70	60	7	10	2,31E-01	6
70	70	7	10	2,69E-01	5
70	80	7	10	3,08E-01	5
70	90	7	10	3,46E-01	4
70	100	7	10	3,85E-01	4
80	10	7	10	5,03E-02	28
80	20	7	10	1,01E-01	14
80	30	7	10	1,51E-01	9
80	40	7	10	2,01E-01	7
80	50	7	10	2,51E-01	6
80	60	7	10	3,02E-01	5
80	70	7	10	3,52E-01	4
80	80	7	10	4,02E-01	4
80	90	7	10	4,52E-01	3
80	100	7	10	5,03E-01	3
90	10	7	10	6,36E-02	22
90	20	7	10	1,27E-01	11
90	30	7	10	1,91E-01	7
90	40	7	10	2,54E-01	6
90	50	7	10	3,18E-01	4
90	60	7	10	3,82E-01	4
90	70	7	10	4,45E-01	3
90	80	7	10	5,09E-01	3
90	90	7	10	5,73E-01	2
90	100	7	10	6,36E-01	2
100	10	7	10	7,85E-02	18
100	20	7	10	1,57E-01	9
100	30	7	10	2,36E-01	6
100	40	7	10	3,14E-01	5
100	50	7	10	3,93E-01	4
100	60	7	10	4,71E-01	3
100	70	7	10	5,50E-01	3
100	80	7	10	6,28E-01	2
100	90	7	10	7,07E-01	2
100	100	7	10	7,85E-01	2



Anhang G: Berechnungen BP-PN 98 ZG

Die nachfolgend beschriebenen Rechenschritte bilden den Inhalt der hinterlegten Excel-Tabelle ab. Die auf einem LKW angelieferten Ballen n_{Ballen} entsprechen in Kombination mit dem Verdichtungsgrad $k_{\text{Verdichtung}}$ und dem Ballenvolumen V_{Ballen} dem Volumen der Grundmenge V_1 :

$$V_1 = n_{\text{Ballen}} * V_{\text{Ballen}} * k_{\text{Verdichtung}} = V_{\text{BLKW}} \quad \text{Gl. Anhang G-1}$$

Mit $V_{0\text{Ballen}}$ wird das Volumen der Grundmenge eines nicht verdichteten Ballens bezeichnet:

$$V_{0\text{Ballen}} = V_{\text{Ballen}} * k_{\text{Verdichtung}} \quad \text{Gl. Anhang G-2}$$

Aus einem Ballen sind mindestens zwei Mischproben mit je 4 Einzelproben n_0 zu ziehen. Aus der gesamten Grundmenge (LKW-Ladung) sind mindestens n_1 Einzelproben zu ziehen:

$$n_1 \geq n_0 * \sqrt[p]{\frac{V_1}{V_{0\text{Ballen}}}} = 4 * \sqrt[2]{\frac{V_1}{V_{0\text{Ballen}}}} \quad \text{Gl. Anhang G-3}$$

Pro Mischprobe m_1 sind mindestens vier Einzelproben nach LAGA PN 98 vorgeschrieben:¹⁰⁸

$$m_1 = \frac{n_1}{4} \quad \text{Gl. Anhang G-4}$$

Aus jedem zu untersuchenden Ballen $n_{\text{BallenBP-PN98}}$ sind mindestens zwei Mischproben zu entnehmen:¹⁰⁹

$$n_{\text{BallenBP-PN98ZG}} = \frac{m_1}{2} \quad \text{Gl. Anhang G-5}$$

Pro Einzelprobe sind zehn Liter Probenmaterial zu entnehmen, sodass das zu entnehmende Volumen $V_{\text{Laborprobe}}$ wie folgt berechnet werden kann:

$$V_{\text{Laborprobe}} = \frac{n_1 * 10}{1000} \quad \text{Gl. Anhang G-6}$$

Daraus ist das Volumen eines einzelnen Volumenelements V_{VE} zu berechnen:

$$V_{\text{VE}} = \frac{\pi * d^2}{4} * l \quad \text{Gl. Anhang G-7}$$

Mit dem Volumen der Laborprobe und des Volumenelements, des Verdichtungsgrades sowie der Anzahl zu beprobender Ballen kann die Anzahl der zu entnehmenden Volumenelemente pro Ballen $n_{\text{BP-PN98ZG}}$ berechnet werden:

$$n_{\text{BP-PN98ZG}} = \frac{V_{\text{Laborprobe}}}{k_{\text{Verdichtung}} * V_{\text{VE}} * n_{\text{BallenBP-PN98ZG}}} \quad \text{Gl. Anhang G-8}$$

¹⁰⁸ Vgl. Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA, (LAGA PN 98, 2004), S. 66.

¹⁰⁹ Ebenda, S. 66 f.

$n_{BP-PN98ZG}$ Anzahl Volumenelemente pro Ballen [Stk.]	V_{VE} Volumen Volumenelement [m³]	d Bohrerdurchmesser [m]	l Volumenelementlänge [m]	$V_{Laborprobe}$ Volumen der zu entnehmenden Laboprobe [m³]	$n_{BallenBP-PN98ZG}$ Anzahl zu beprobende Ballen [Stk.]	m_1 Anzahl Mischproben [Stk.]	n_1 Anzahl Einzelproben [Stk.]	$k_{Verdichtung}$ \emptyset Verdichtungsgrad [-]	$V_{\emptyset Ballen}$ \emptyset Ballenvolumen [m³]	V_1 Grundmenge [m³]
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,42	5	10	42	7	9,1	1000
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,40	5	10	40	7	9,1	900
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,38	5	9	38	7	9,1	800
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,35	4	9	35	7	9,1	700
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,32	4	8	32	7	9,1	600
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,30	4	7	30	7	9,1	500
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,27	3	7	27	7	9,1	400
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,23	3	6	23	7	9,1	300
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,19	2	5	19	7	9,1	200
40	2,83E-04	0,06	0,10	0,09	1	2	9	7	9,1	50
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,42	5	10	42	7	9,1	1000
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,40	5	10	40	7	9,1	900
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,38	5	9	38	7	9,1	800
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,35	4	9	35	7	9,1	700
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,32	4	8	32	7	9,1	600
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,30	4	7	30	7	9,1	500
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,27	3	7	27	7	9,1	400
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,23	3	6	23	7	9,1	300
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,19	2	5	19	7	9,1	200
15	7,85E-04	0,1	0,10	0,09	1	2	9	7	9,1	50

Anhang H: Berechnungen BP-Integral ZG

Die auf einem LKW angelieferten Ballen n_{Ballen} entsprechen in Kombination mit dem Verdichtungsgrad $k_{\text{Verdichtung}}$ und dem Ballenvolumen V_{Ballen} dem Volumen der Grundmenge V_1 :

$$V_{\text{BLKW}} = V_1 = n_{\text{Ballen}} * V_{\text{Ballen}} * k_{\text{Verdichtung}} \quad \text{Gl. Anhang H-1}$$

Anders als in der Norm entspricht $V_{0\text{Ballen}}$ bei Anwendung auf die Ballenbeprobung nicht dem Transportvolumen des LKW, sondern dem Volumen eines entspannten Ballens:

$$V_{0\text{Ballen}} = V_{\text{Ballen}} * k_{\text{Verdichtung}} \quad \text{Gl. Anhang H-2}$$

Der Volumenvergrößerungsfaktor¹¹⁰ V_{HBallen} bildet sich demzufolge aus:

$$V_{\text{HBallen}} = \frac{\log(V_1)}{\log(V_{0\text{Ballen}})} \quad \text{Gl. Anhang H-3}$$

Da die Qualitäten des Ballenmaterials stark schwanken, ist die Ermittlung der Mindestzahl der Einzel- und Laborproben für den Fall unbekannter Streuungen zu bevorzugen. Das Heterogenitätsverhältnis H_{Ballen} wird aus dem Heterogenitätsfaktor $H_{0\text{Ballen}}$ mal dem Volumenvergrößerungsfaktor gebildet:

$$H_{\text{Ballen}} = H_{0\text{Ballen}} * V_{\text{HBallen}} \quad \text{mit } H_{0\text{Ballen}} \geq 10 \quad \text{Gl. Anhang H-4}$$

Für die Berechnung der Einzelproben n_{VE0} aus dem Ballen ist die Mindestanzahl der Laborproben mit $m_{\text{LP}} = 2$ zu wählen. V_{minEP} ist mit 4,5/6 L anzunehmen.¹¹¹ Über die Anzahl der Einzelproben kann das Volumen der zu entnehmenden Laborprobe $V_{\text{Laborprobe}}$ berechnet werden. Unter Einbeziehung des Verdichtungsgrades ist die Berechnung der verdichteten Laborprobe $V_{\text{Laborprobe-k}}$ möglich. Wird dieses Volumen durch das Volumen eines Volumenelements V_{VE} geteilt, kann die Anzahl der verdichteten Volumenelemente n_{VE} bestimmt werden. Um die Anzahl der zu entnehmenden Volumenelemente pro Ballen $n_{\text{BP-IntegralZG}}$ zu ermitteln, muss n_{VE} durch die Anzahl der zu beprobenden Ballen $n_{\text{BallenBP-IntegralZG}}$ geteilt werden.

$$n_{\text{VE0}} = \frac{m_{\text{LP}} * H_{\text{Ballen}}^2}{(10 * m_{\text{LP}} - 1)} \quad \text{Gl. Anhang H-5}$$

$$V_{\text{Laborprobe}} = \frac{n_{\text{VE0}} * V_{\text{MinEP}}}{1000} \quad \text{Gl. Anhang H-6}$$

$$V_{\text{Laborprobe-k}} = \frac{V_{\text{Laborprobe}}}{k_{\text{Verdichtung}}} \quad \text{Gl. Anhang H-7}$$

$$V_{\text{VE}} = \frac{\pi * d^2}{4} * l \quad \text{Gl. Anhang H-8}$$

$$n_{\text{VE}} = \frac{V_{\text{Laborprobe-k}}}{V_{\text{VE}}} \quad \text{Gl. Anhang H-9}$$

$$n_{\text{BP-IntegralZG}} = \frac{n_{\text{VE}}}{n_{\text{BallenBP-IntegralZG}}} \quad \text{Gl. Anhang H-10}$$

¹¹⁰ Vgl. DIN 19698-2:2016-12, S. 14.

¹¹¹ Ebenda.

In den aufgeführten Excel-Tabellen wurde die Grundmenge variiert, sodass die Anzahl der Volumenelemente pro Ballen $n_{\text{BP-IntegralZG}}$ ermittelt wurde. Die Ballenanzahl $n_{\text{BallenBP-IntegralZG}}$ ist in der linken Tabelle mit 2 Ballen fest gewählt. Sollen mittels der Methode „BP-Integral ZG“ mehrere Ballen kontrolliert werden, gibt die DIN ISO 18414:2012-02 eine Hilfestellung bei der Auswahl von $n_{\text{BallenBP-IntegralZG}}$, siehe Tabelle unten rechts. Wenn der Kunde dem Lieferanten ein Vertrauen in Höhe von $K = 25 \%$, bei einem zulässigen Schlupf von $a_{\text{MD}} = 0,2$ gewährt, dann sind zwei Ballen zu beproben.¹¹²

$$N = n_{\text{BallenGrundmenge}} = \frac{V_{\text{BLKW}}}{V_{0\text{Ballen}}} \quad \text{Gl. Anhang H-11}$$

$$n_{BallenBP-IntegralZG} = \frac{N}{(K+N) * a_{MD} + 1} = \frac{20}{(25+20) * 0,2 + 1} = 2 \quad \text{Gl. Anhang H-12}$$

V_1	Grundmenge [m³]	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100	50	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100	50
V_{Ballen}	Ø Ballenvolumen [m³]	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
$k_{\text{Verdichtung}}$	Ø Verdichtungsgrad [-]	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
$H_{\text{ØBallen}}$	Heterogenitätsfaktor [-]	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
V_{HBallen}	Volumenvergrößerungs-faktor [-]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
H_{Ballen}	Heterogenitätsverhältnis [-]	31	31	31	30	30	29	28	27	26	24	21	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
m_{EP}	Mindestanzahl Laborproben [Stk.]	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
V_{MinEP}	Mindestvolumen Einzelprobe [L]	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
n_{VE}	Anzahl Einzelproben a 4,5 Liter [Stk.]	103	100	96	93	88	83	77	73	61	46	33	103	100	96	93	88	83	77	73	61	46	33
$V_{\text{Laborprobe}}$	Volumen der zu entnehmenden Laborprobe [m³]	0,46	0,45	0,43	0,42	0,40	0,38	0,35	0,32	0,27	0,21	0,15	0,46	0,45	0,43	0,42	0,40	0,38	0,35	0,32	0,27	0,21	0,15
$V_{\text{Laborprobe-k}}$	Volumen der zu entnehmenden Laborprobe inkl. Verdichtungsgrad [m³]	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02
l	Volumenelementlänge [m]	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
d	Bohrerdurchmesser [m]	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
V_{VE}	Volumen Volumenelement [m³]	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04	2,83E-04
n_{VE}	Anzahl Volumenelemente verdichtet [Stk.]	234	227	219	211	205	190	176	160	138	104	75	234	227	219	211	205	190	176	160	138	104	75
n_{Ballen}	Anzahl zu beprobender Ballen [Stk.]	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$n_{\text{BP-Integral}}$	Anzahl Volumenelemente pro Ballen [Stk.]	117	114	110	105	100	95	88	80	69	52	38	117	114	110	105	100	95	88	80	69	52	38

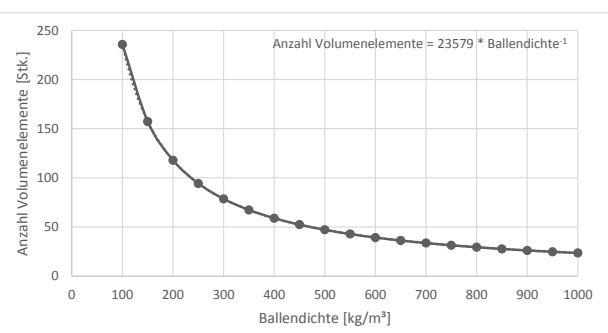
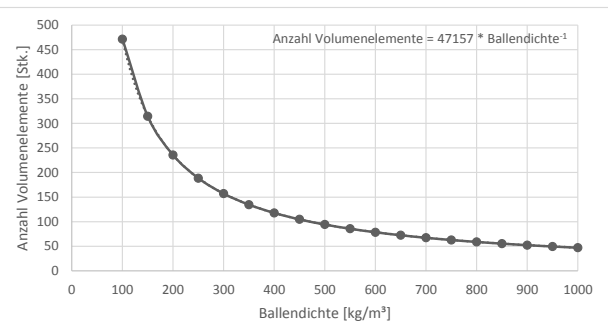
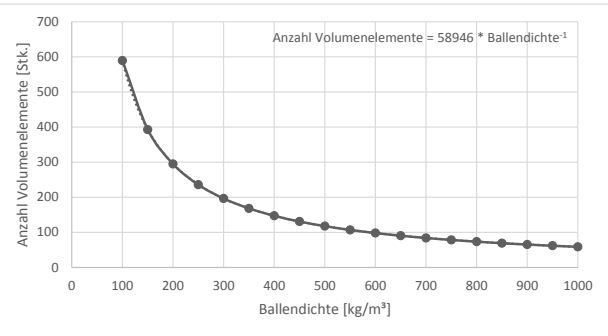
V_1	V_{Ballen}	$n_{\text{BallenGrundmenge}}$	$k_{\text{Verdichtung}}$	$H_{\text{Heterogenität}}$	V_{HBallen}	$H_{\text{Heterogenität}}$	m_{LP}	V_{MinEP}	n_{VE0}	V_{Labprobe}	V_{labprobe}	I	d	V_{VE}	n_{VE}	$n_{\text{BallenBP-Integratzu}}$	$n_{\text{BP-Integratzu}}$
[m³]	[m³]	Ballen aus Grundmenge [Stk.]	Ø Verdichtungsgrad [-]	Ø Heterogenitätsfaktor [-]	Volumenvergrößerungsfaktor [-]	Ø Heterogenitätsverhältnis [-]	Mindestanzahl Labproben [Stk.]	Mindestvolumen Einzelprobe [L]	Anzahl Einzelproben a 4,5 Liter [Stk.]	Volumen der zu entnehmenden Labprobe [m³]	Volumen der zu entnehmenden Labprobe inkl. Verdichtungsgrad [m³]	Volumenelementlänge [m]	[m]	Volumenelement [m³]	Anzahl Volumenelemente verdichtet [Stk.]	Anzahl zu beprobender Ballen nach (DIN ISO 18414:2012-02) [Stk.]	Anzahl Volumenelemente pro Ballen [Stk.]
1000	9,1	110	7	10	3	31	2	4,5	103	0,46	0,07	0,10	0,06	2,83E-04	234	4	60
900	9,1	99	7	10	3	31	2	4,5	100	0,45	0,06	0,10	0,06	2,83E-04	227	4	59
800	9,1	88	7	10	3	30	2	4,5	96	0,42	0,06	0,10	0,06	2,83E-04	219	4	59
700	9,1	77	7	10	3	30	2	4,5	93	0,40	0,06	0,10	0,06	2,83E-04	211	4	59
600	9,1	66	7	10	3	29	2	4,5	88	0,40	0,06	0,10	0,06	2,83E-04	201	3	58
500	9,1	55	7	10	3	28	2	4,5	83	0,38	0,05	0,10	0,06	2,83E-04	190	3	59
400	9,1	44	7	10	3	27	2	4,5	77	0,35	0,05	0,10	0,06	2,83E-04	176	3	59
300	9,1	33	7	10	3	26	2	4,5	70	0,32	0,05	0,10	0,06	2,83E-04	160	3	61
200	9,1	22	7	10	2	24	2	4,5	61	0,27	0,04	0,10	0,06	2,83E-04	138	2	65
100	9,1	11	7	10	2	21	2	4,5	46	0,21	0,03	0,10	0,06	2,83E-04	104	1	78
50	9,1	5	7	10	2	18	2	4,5	33	0,15	0,02	0,10	0,06	2,83E-04	75	1	97
1000	9,1	110	7	10	3	31	2	6,0	103	0,62	0,09	0,10	0,1	7,85E-04	112	4	29
900	9,1	99	7	10	3	31	2	6,0	100	0,60	0,09	0,10	0,1	7,85E-04	109	4	28
800	9,1	88	7	10	3	30	2	6,0	96	0,58	0,08	0,10	0,1	7,85E-04	105	4	28
700	9,1	77	7	10	3	30	2	6,0	93	0,56	0,08	0,10	0,1	7,85E-04	101	4	28
600	9,1	66	7	10	3	29	2	6,0	88	0,53	0,08	0,10	0,1	7,85E-04	96	3	28
500	9,1	55	7	10	3	28	2	6,0	83	0,50	0,07	0,10	0,1	7,85E-04	91	3	28
400	9,1	44	7	10	3	27	2	6,0	77	0,46	0,07	0,10	0,1	7,85E-04	85	3	28
300	9,1	33	7	10	3	26	2	6,0	70	0,42	0,06	0,10	0,1	7,85E-04	77	3	29
200	9,1	22	7	10	2	24	2	6,0	61	0,36	0,05	0,10	0,1	7,85E-04	66	2	31
100	9,1	11	7	10	2	21	2	6,0	46	0,27	0,04	0,10	0,1	7,85E-04	50	1	37
50	9,1	5	7	10	2	18	2	6,0	33	0,20	0,03	0,10	0,1	7,85E-04	36	1	47

¹¹² Vgl. DIN ISO 18414:2012-02, S. 14 ff.

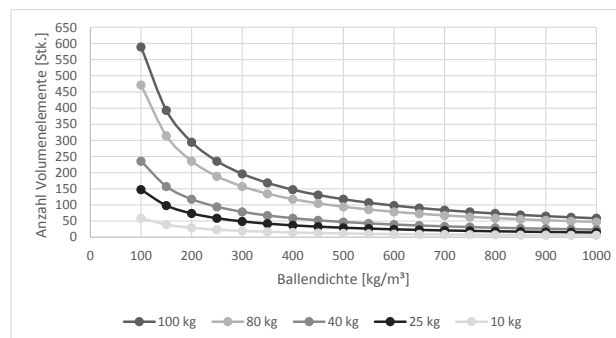
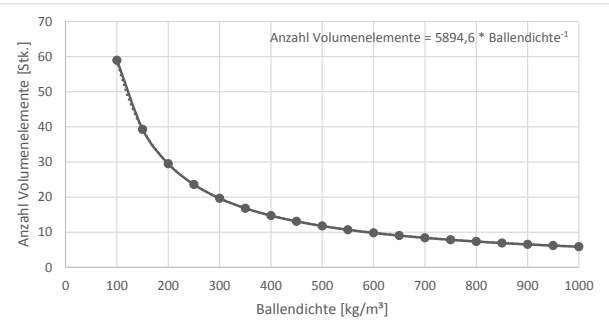
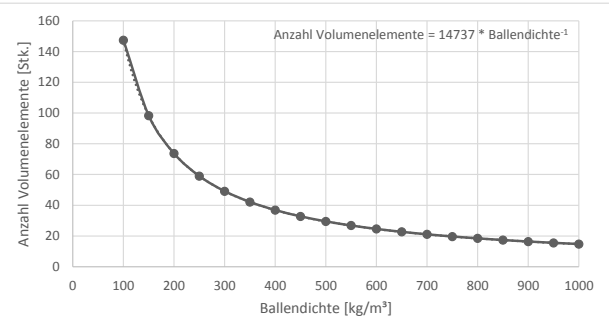
Anhang I: Berechnungen BP-Sortier ZG

Anhang I.1: Anzahl Volumenelemente für Bohrerdurchmesser 60 mm

m_{Probe} Probenmenge [kg]	ρ_{Ballen} Ballendichte [kg/m ³]	V_{Bohrer} Volumen Bohrer [m ³]	$n_{\text{BP-sortier}}$ Anzahl Volumenelemente [Stk.]	d Bohrerdurchmesser [m]
100	1000	1,70E-03	59	0,06
100	950	1,70E-03	62	0,06
100	900	1,70E-03	65	0,06
100	850	1,70E-03	69	0,06
100	800	1,70E-03	74	0,06
100	750	1,70E-03	79	0,06
100	700	1,70E-03	84	0,06
100	650	1,70E-03	91	0,06
100	600	1,70E-03	98	0,06
100	550	1,70E-03	107	0,06
100	500	1,70E-03	118	0,06
100	450	1,70E-03	131	0,06
100	400	1,70E-03	147	0,06
100	350	1,70E-03	168	0,06
100	300	1,70E-03	196	0,06
100	250	1,70E-03	236	0,06
100	200	1,70E-03	295	0,06
100	150	1,70E-03	393	0,06
100	100	1,70E-03	589	0,06
80	1000	1,70E-03	47	0,06
80	950	1,70E-03	50	0,06
80	900	1,70E-03	52	0,06
80	850	1,70E-03	55	0,06
80	800	1,70E-03	59	0,06
80	750	1,70E-03	63	0,06
80	700	1,70E-03	67	0,06
80	650	1,70E-03	73	0,06
80	600	1,70E-03	79	0,06
80	550	1,70E-03	86	0,06
80	500	1,70E-03	94	0,06
80	450	1,70E-03	105	0,06
80	400	1,70E-03	118	0,06
80	350	1,70E-03	135	0,06
80	300	1,70E-03	157	0,06
80	250	1,70E-03	189	0,06
80	200	1,70E-03	236	0,06
80	150	1,70E-03	314	0,06
80	100	1,70E-03	472	0,06
40	1000	1,70E-03	24	0,06
40	950	1,70E-03	25	0,06
40	900	1,70E-03	26	0,06
40	850	1,70E-03	28	0,06
40	800	1,70E-03	29	0,06
40	750	1,70E-03	31	0,06
40	700	1,70E-03	34	0,06
40	650	1,70E-03	36	0,06
40	600	1,70E-03	39	0,06
40	550	1,70E-03	43	0,06
40	500	1,70E-03	47	0,06
40	450	1,70E-03	52	0,06
40	400	1,70E-03	59	0,06
40	350	1,70E-03	67	0,06
40	300	1,70E-03	79	0,06
40	250	1,70E-03	94	0,06
40	200	1,70E-03	118	0,06
40	150	1,70E-03	157	0,06
40	100	1,70E-03	236	0,06

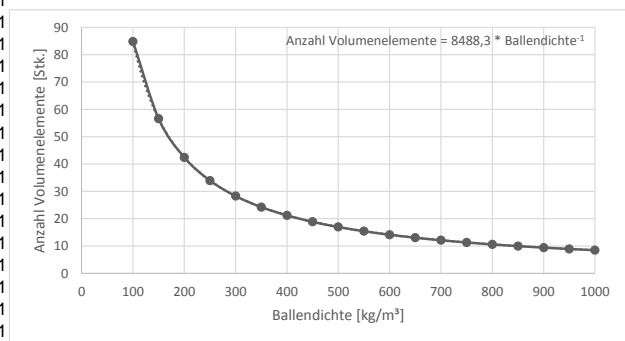
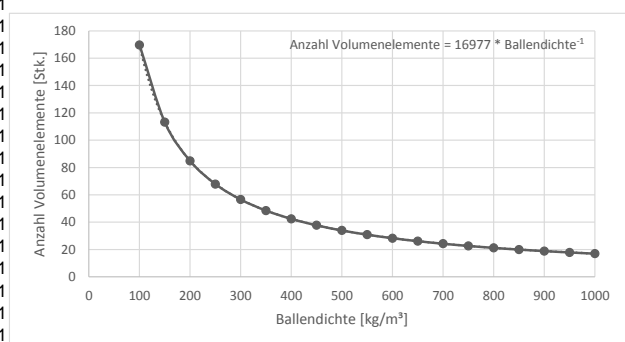
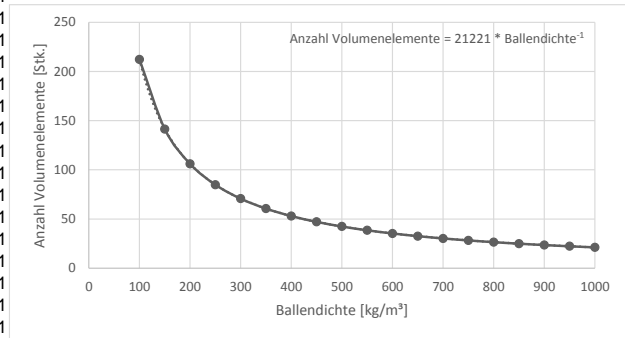


25	1000	1,70E-03	15	0,06
25	950	1,70E-03	16	0,06
25	900	1,70E-03	16	0,06
25	850	1,70E-03	17	0,06
25	800	1,70E-03	18	0,06
25	750	1,70E-03	20	0,06
25	700	1,70E-03	21	0,06
25	650	1,70E-03	23	0,06
25	600	1,70E-03	25	0,06
25	550	1,70E-03	27	0,06
25	500	1,70E-03	29	0,06
25	450	1,70E-03	33	0,06
25	400	1,70E-03	37	0,06
25	350	1,70E-03	42	0,06
25	300	1,70E-03	49	0,06
25	250	1,70E-03	59	0,06
25	200	1,70E-03	74	0,06
25	150	1,70E-03	98	0,06
25	100	1,70E-03	147	0,06
<hr/>				
10	1000	1,70E-03	6	0,06
10	950	1,70E-03	6	0,06
10	900	1,70E-03	7	0,06
10	850	1,70E-03	7	0,06
10	800	1,70E-03	7	0,06
10	750	1,70E-03	8	0,06
10	700	1,70E-03	8	0,06
10	650	1,70E-03	9	0,06
10	600	1,70E-03	10	0,06
10	550	1,70E-03	11	0,06
10	500	1,70E-03	12	0,06
10	450	1,70E-03	13	0,06
10	400	1,70E-03	15	0,06
10	350	1,70E-03	17	0,06
10	300	1,70E-03	20	0,06
10	250	1,70E-03	24	0,06
10	200	1,70E-03	29	0,06
10	150	1,70E-03	39	0,06
10	100	1,70E-03	59	0,06

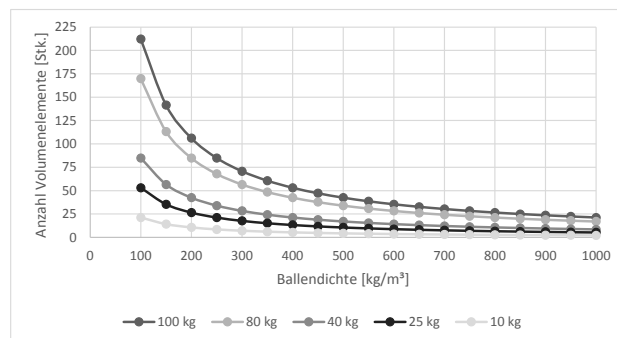
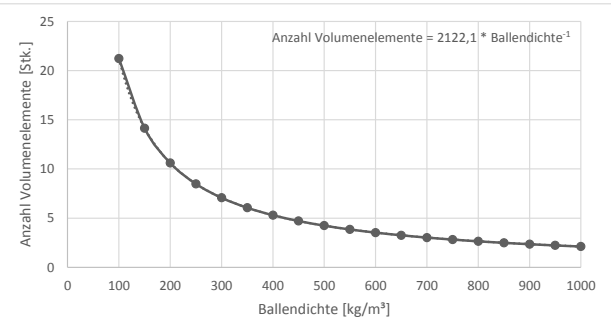
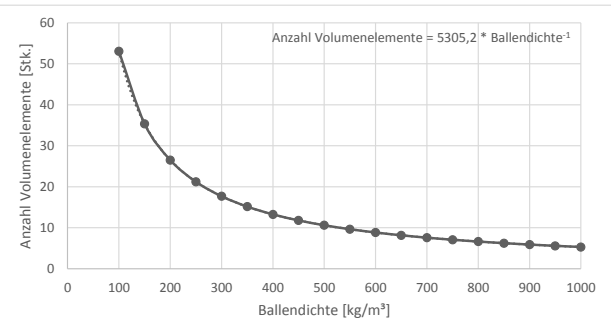


Anhang I.2: Anzahl Volumenelemente für Bohrerdurchmesser 100 mm

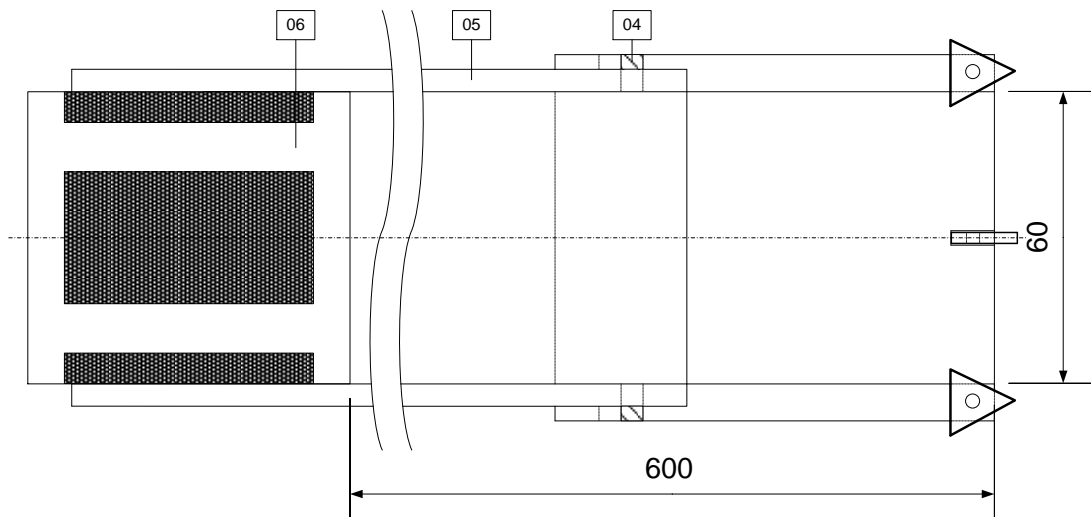
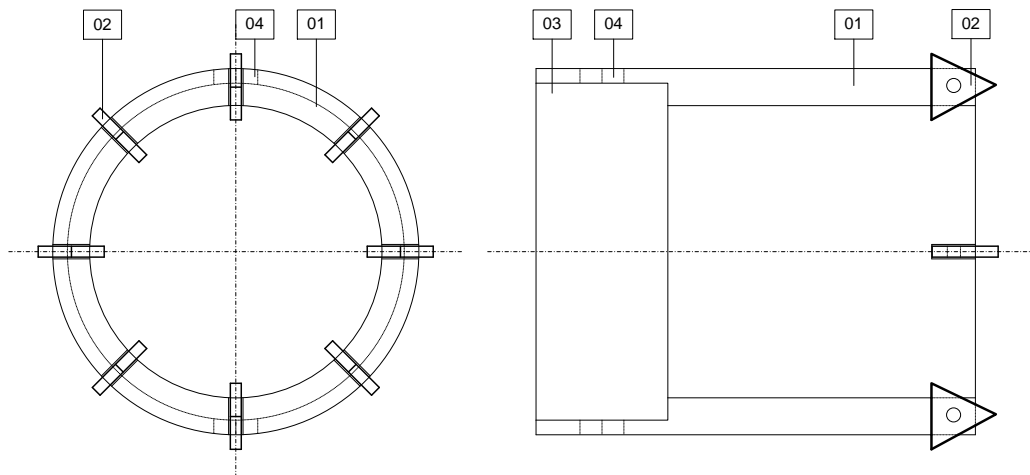
m_{Probe} Probenmenge [kg]	ρ_{Ballen} Ballendichte [kg/m ³]	V_{Bohrer} Volumen Bohrer [m ³]	$n_{\text{BP-Sortier}}$ Anzahl Volumenelemente [Stk.]	d Bohrerdurchmesser [m]
100	1000	4,71E-03	21	0,1
100	950	4,71E-03	22	0,1
100	900	4,71E-03	24	0,1
100	850	4,71E-03	25	0,1
100	800	4,71E-03	27	0,1
100	750	4,71E-03	28	0,1
100	700	4,71E-03	30	0,1
100	650	4,71E-03	33	0,1
100	600	4,71E-03	35	0,1
100	550	4,71E-03	39	0,1
100	500	4,71E-03	42	0,1
100	450	4,71E-03	47	0,1
100	400	4,71E-03	53	0,1
100	350	4,71E-03	61	0,1
100	300	4,71E-03	71	0,1
100	250	4,71E-03	85	0,1
100	200	4,71E-03	106	0,1
100	150	4,71E-03	141	0,1
100	100	4,71E-03	212	0,1
<hr/>				
80	1000	4,71E-03	17	0,1
80	950	4,71E-03	18	0,1
80	900	4,71E-03	19	0,1
80	850	4,71E-03	20	0,1
80	800	4,71E-03	21	0,1
80	750	4,71E-03	23	0,1
80	700	4,71E-03	24	0,1
80	650	4,71E-03	26	0,1
80	600	4,71E-03	28	0,1
80	550	4,71E-03	31	0,1
80	500	4,71E-03	34	0,1
80	450	4,71E-03	38	0,1
80	400	4,71E-03	42	0,1
80	350	4,71E-03	49	0,1
80	300	4,71E-03	57	0,1
80	250	4,71E-03	68	0,1
80	200	4,71E-03	85	0,1
80	150	4,71E-03	113	0,1
80	100	4,71E-03	170	0,1
<hr/>				
40	1000	4,71E-03	8	0,1
40	950	4,71E-03	9	0,1
40	900	4,71E-03	9	0,1
40	850	4,71E-03	10	0,1
40	800	4,71E-03	11	0,1
40	750	4,71E-03	11	0,1
40	700	4,71E-03	12	0,1
40	650	4,71E-03	13	0,1
40	600	4,71E-03	14	0,1
40	550	4,71E-03	15	0,1
40	500	4,71E-03	17	0,1
40	450	4,71E-03	19	0,1
40	400	4,71E-03	21	0,1
40	350	4,71E-03	24	0,1
40	300	4,71E-03	28	0,1
40	250	4,71E-03	34	0,1
40	200	4,71E-03	42	0,1
40	150	4,71E-03	57	0,1
40	100	4,71E-03	85	0,1



25	1000	4,71E-03	5	0,1
25	950	4,71E-03	6	0,1
25	900	4,71E-03	6	0,1
25	850	4,71E-03	6	0,1
25	800	4,71E-03	7	0,1
25	750	4,71E-03	7	0,1
25	700	4,71E-03	8	0,1
25	650	4,71E-03	8	0,1
25	600	4,71E-03	9	0,1
25	550	4,71E-03	10	0,1
25	500	4,71E-03	11	0,1
25	450	4,71E-03	12	0,1
25	400	4,71E-03	13	0,1
25	350	4,71E-03	15	0,1
25	300	4,71E-03	18	0,1
25	250	4,71E-03	21	0,1
25	200	4,71E-03	27	0,1
25	150	4,71E-03	35	0,1
25	100	4,71E-03	53	0,1
<hr/>				
10	1000	4,71E-03	2	0,1
10	950	4,71E-03	2	0,1
10	900	4,71E-03	2	0,1
10	850	4,71E-03	2	0,1
10	800	4,71E-03	3	0,1
10	750	4,71E-03	3	0,1
10	700	4,71E-03	3	0,1
10	650	4,71E-03	3	0,1
10	600	4,71E-03	4	0,1
10	550	4,71E-03	4	0,1
10	500	4,71E-03	4	0,1
10	450	4,71E-03	5	0,1
10	400	4,71E-03	5	0,1
10	350	4,71E-03	6	0,1
10	300	4,71E-03	7	0,1
10	250	4,71E-03	8	0,1
10	200	4,71E-03	11	0,1
10	150	4,71E-03	14	0,1
10	100	4,71E-03	21	0,1



Anhang J: Skizze Zackenbohrer Ø 60 mm



Legende:

- 01 Bohrkronen
- 02 Wendeschneidplatten Hartmetall (8x)
- 03 Aufnahme Kernbohrer Rohr
- 04 Bajonettverschluss Bohrkopf (2x)
- Bohrer-Drehrichtung Rechts
- 05 Kernbohrer Rohr
- 06 Spanndorn mit Maschinenaufnahme

Datei:
Zackenbohrer_600_60m
m.vsd

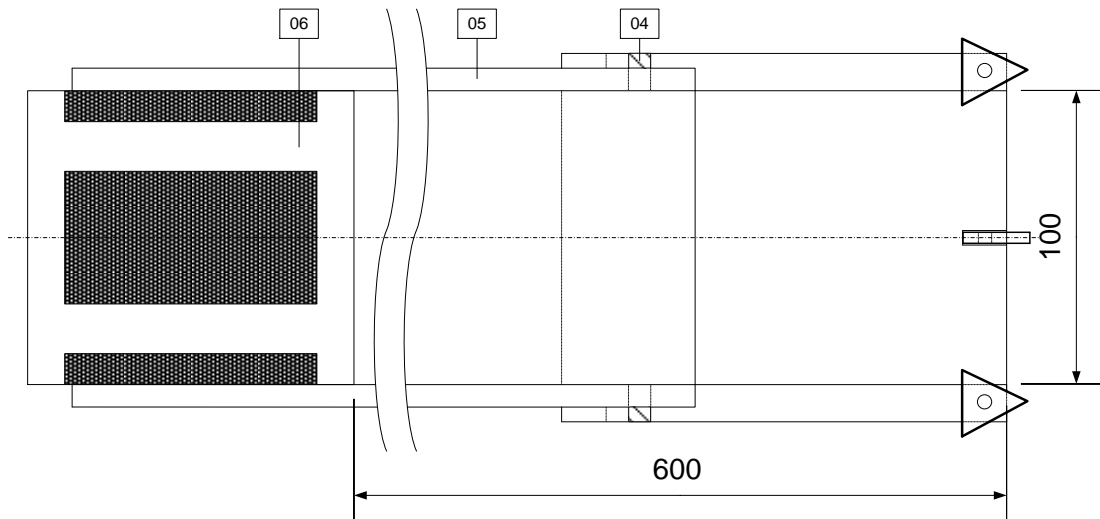
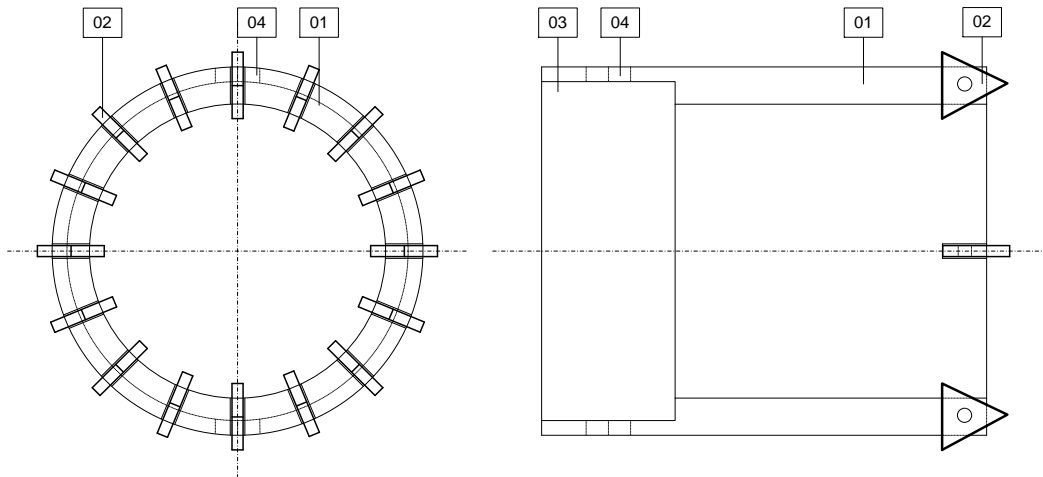
Werkstoff: Stahlrohr,
Wendeschneidplatten HSS
dreieckig

Zackenbohrer Ø 60 mm

**HOCHSCHULE
NORDHAUSEN**
University of Applied Sciences

Erstelldat.: 02.02.16 Änd.-Dat.: 23.01.17 Erstellt von:
Christian Borowski, M.Eng.

Anhang K: Skizze Zackenbohrer Ø 100 mm



Legende:

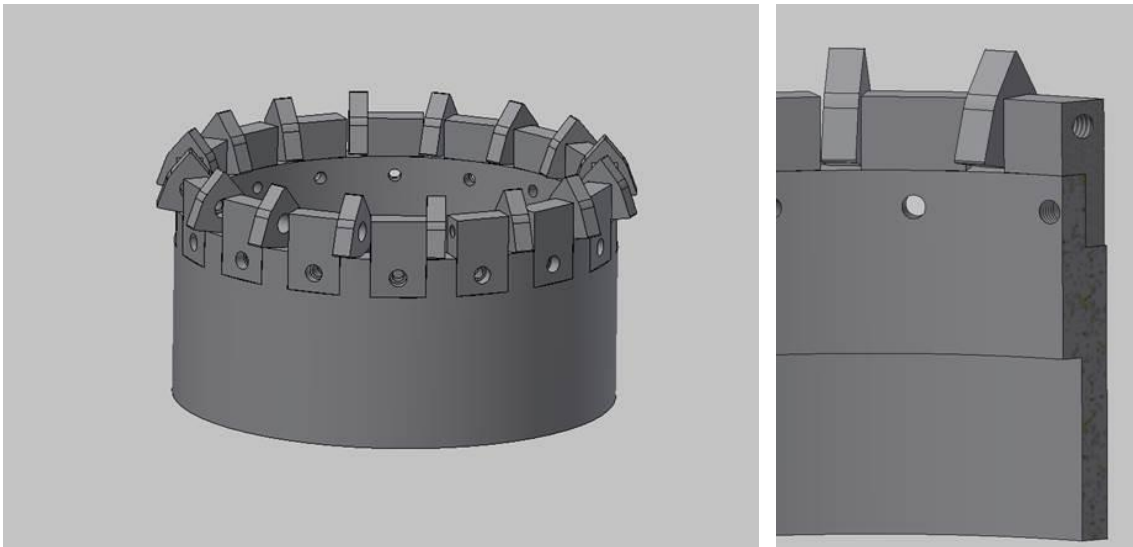
- 01 Bohrkronen
- 02 Wendeschneidplatten Hartmetall (16x)
- 03 Aufnahme Kernbohrer Rohr
- 04 Bajonettverschluss Bohrkopf (2x)
- 05 Bohrer-Drehrichtung Rechts
- 06 Kernbohrer Rohr
- 07 Spanndorn mit Maschinenaufnahme

Datei:
Zackenbohrer_600_100
mm.vsd

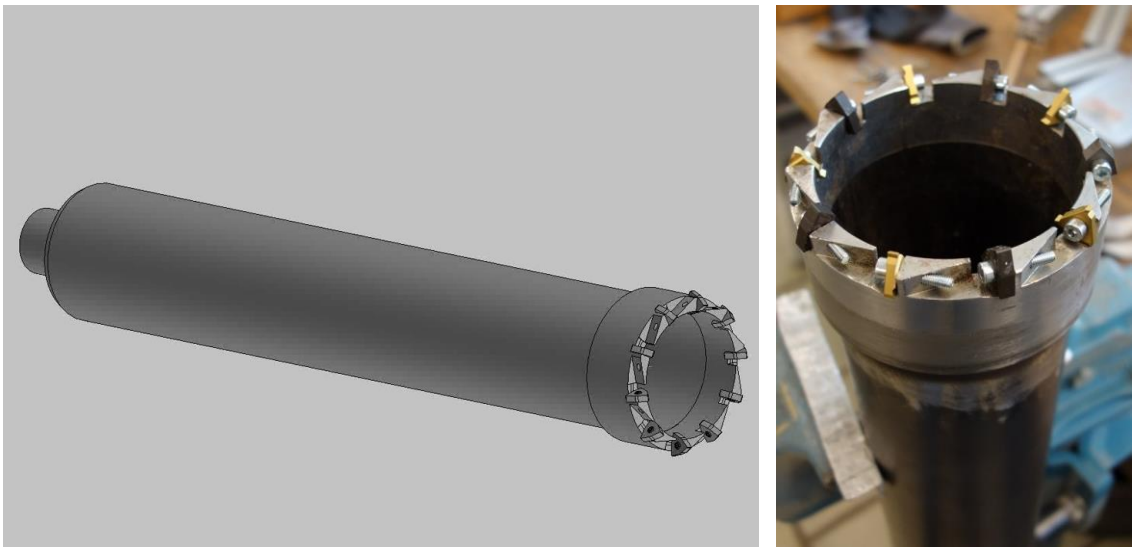
Werkstoff: Stahlrohr,
Wendeschneidplatten HSS
dreieckig

Zackenbohrer Ø 100 mm

Anhang L: Zackenbohrkrone wartungsfähig



Die Bohrkronen bestehen aus drei Teilen: der Wendschneidplatte, dem Befestigungsring und dem Bohrkernrohr. Der Vorteil dieser Konstruktion ist, dass die Wendschneidplatten von beiden Seiten flächig fixiert sind. Es tritt um den Mittelpunkt der Wendschneidplatte kein Drehmoment auf. Diese Konstruktion konnte nicht realisiert werden, da dem Maschinenbauer nicht die technischen Möglichkeiten zum Bau einer solchen Konstruktion zur Verfügung standen.



Daher wurde die Konstruktion abgewandelt und der Befestigungsring entfernt. Bei der Finallösung werden die Wendschneidplatten mittig über eine Schraubverbindung an den Bohrkopf inkl. Bohrkernrohr befestigt. Wird mit dieser Konstruktion gebohrt, entsteht ein Drehmoment. Die Entfernungen von den Spitzen der Wendschneidplatten bis zur Schraubenmitte bilden dabei das Maximum des möglichen Drehmomentes ab. Werden die Schrauben nicht gesichert, bspw. mit Schraubensicherung Marke Loctite, können sich diese durch die entstehenden Kräfte und Vibrationen lösen. Sind die Schrauben nicht lang genug, können die Wendschneidplatten zudem verloren gehen.

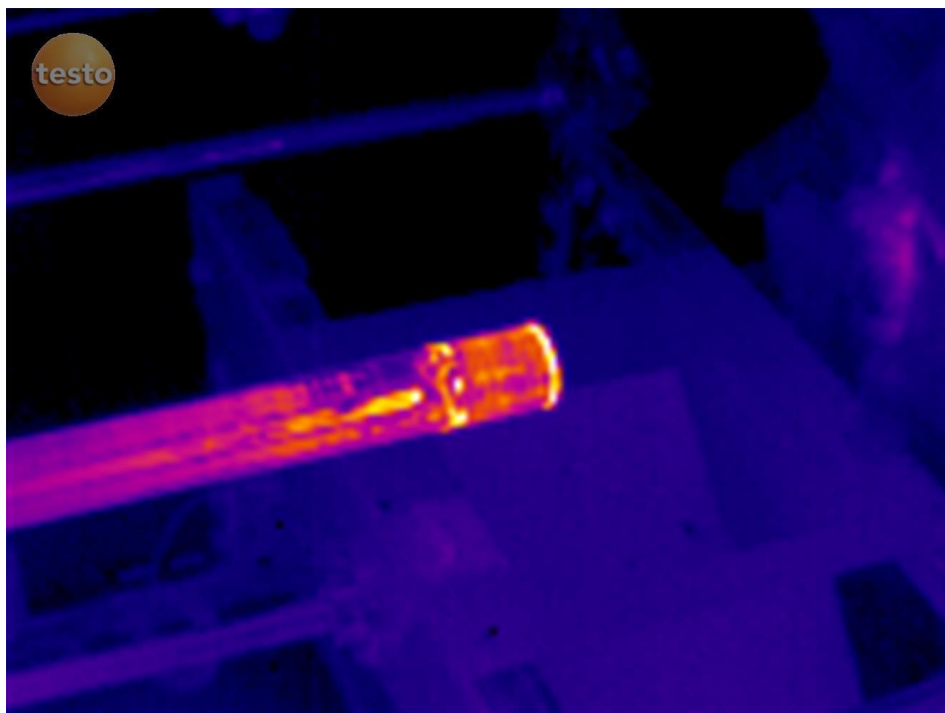
Anhang M: Bohrgruppen und Störstoffanteil der DSD-Fractionen

Fraktion	Fraktions-Nr.	Material (Art)	Störstoffanteil [M. %] Max.	Bohrgruppe
Gemischte Kunststoff-Flaschen	320	Kunststoff hart	6	I
Polyolefin-Flaschen	321	Kunststoff hart	6	I
Kunststoff-Hohlkörper	322	Kunststoff hart	6	I
Polypropylen	324	Kunststoff hart	6	I
Polypropylen Plus	324-1	Kunststoff hart	6	I
PET-Flaschen, transparent	325	Kunststoff hart	2	I
Misch-PET 90/10	328-1	Kunststoff hart	2	I
Misch-PET 70/30	328-2	Kunststoff hart	2	I
Misch-PET 50/50	328-3	Kunststoff hart	2	I
Polyethylen	329	Kunststoff hart	6	I
Becher	330	Kunststoff hart	6	I
Polystyrol	331	Kunststoff hart	6	I
PPK aus LVP	550	Gemisch weich	10	II
Kunststoff-Folien 310	310	Kunststoff weich	8	II
Kunststoff-Folien 310 - 1	310 - 1	Kunststoff weich	8	II
Expandiertes Polystyrol	340	Kunststoff weich	3	II
MPO Beiprodukt (KEG)	361	Kunststoff weich und hart	60	III
Flüssigkeitskartons	510	Gemisch weich und hart	10	III
Ersatzbrennstoff-Vorprodukt	365	Gemisch weich und hart	10	III
LVP-Sortierreste Mittel & Überkorn	831	Gemisch weich und hart	10	III
Gemischte PO-Artikel (MPO)	323	Kunststoff weich und hart	15	III
Mischkunststoffe	350	Kunststoff weich und hart	10	III
Formstabile Kunststoffe 1	351-1	Kunststoff weich und hart	20	III
Formstabile Kunststoffe 2	351-2	Kunststoff weich und hart	30	III
Formstabile Kunststoffe 3	351-3	Kunststoff weich und hart	40	III
Formstabile Kunststoffe 4	351-4	Kunststoff weich und hart	50	III
Mischkunststoffe neu	352	Kunststoff weich und hart	10	III
Mischkunststoff	352-1	Kunststoff weich und hart	15	III
Weißblech	410	Metall	7	IV
Weißblech-SPEZ-2011	412	Metall	33	IV
Aluminium-Spez-2012	420	Metall	10	IV

Anhang N: Daten Bohrversuche Bohrkronentemperatur PET-Ballen

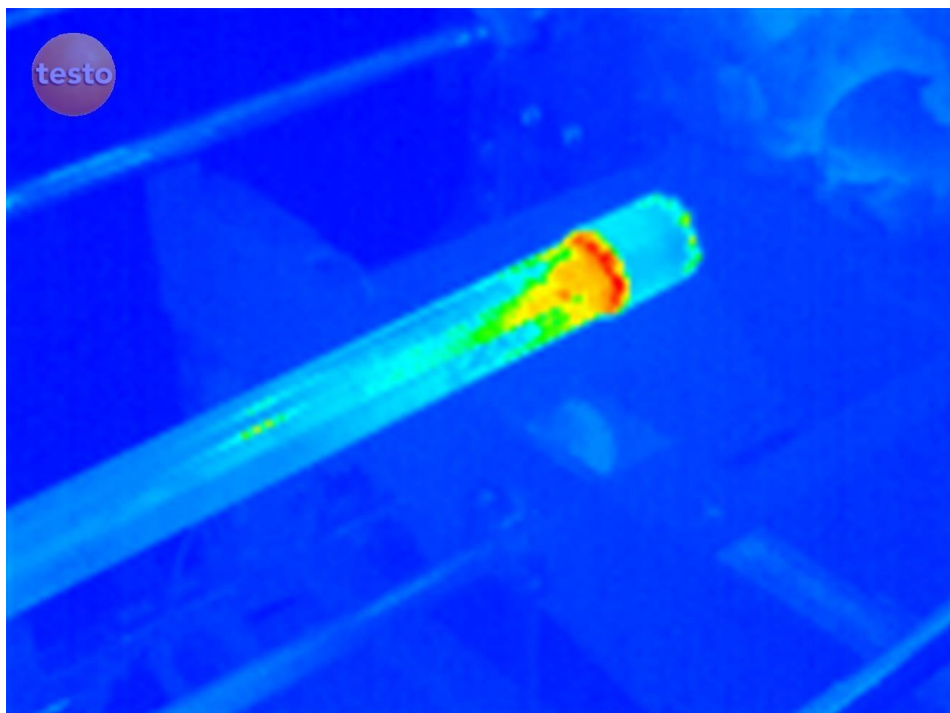
Anhang N.1: Temperaturübersicht der Fliesenbohrkrone

Bohrdurchgang		Temperaturen [°C]			
		I	II	III	IV
1. Bohrung	Kopf	-	52,30	48,20	62,40
	Rohr	-	44,40	42,80	54,50
2. Bohrung	Kopf	-	60,40	54,30	73,20
	Rohr	-	44,70	47,20	58,20
3. Bohrung	Kopf	-	59,30	46,20	72,10
	Rohr	-	45,70	42,90	59,30
4. Bohrung	Kopf	-	59,20	60,80	69,70
	Rohr	-	44,70	52,00	61,60
5. Bohrung	Kopf	-	54,50	36,20	59,20
	Rohr	-	43,60	35,10	50,10
6. Bohrung	Kopf	-	49,70	54,50	70,20
	Rohr	-	40,10	44,60	58,20
7. Bohrung	Kopf	-	47,80	48,70	56,50
	Rohr	-	38,70	43,60	43,00
8. Bohrung	Kopf	-	-	-	49,10
	Rohr	-	-	-	58,20



Anhang N.2: Temperaturübersicht der Zackenbohrkrone

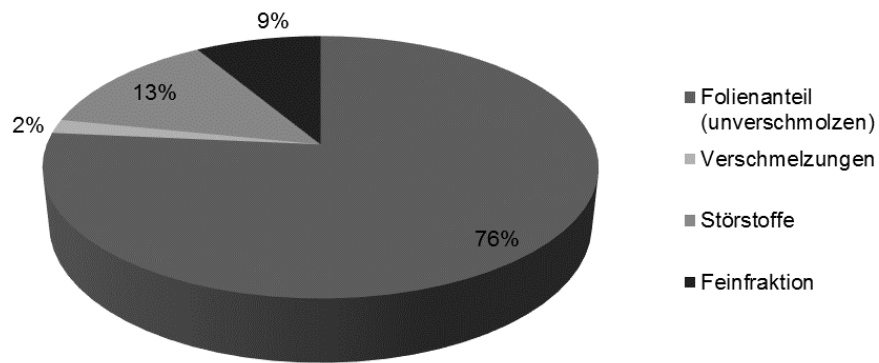
		Temperaturen [°C]			
Bohrdurchgang		V	VI	VII	VIII
1.Bohrung	Kopf	54,50	43,70	-	43,10
	Rohr / Kern	43,80	34,00	-	26,90
2.Bohrung	Kopf	56,20	44,20	-	55,20
	Rohr / Kern	41,60	33,70	-	32,20
3.Bohrung	Kopf	52,70	48,70	-	58,60
	Rohr / Kern	41,30	38,60	-	35,60
4.Bohrung	Kopf	46,90	42,80	-	59,60
	Rohr / Kern	38,20	51,90	-	30,50
5.Bohrung	Kopf	49,90	60,10	-	53,00
	Rohr / Kern	38,70	52,40	-	29,00
6.Bohrung	Kopf	-	-	-	58,50
	Rohr / Kern	-	-	-	34,70
7.Bohrung	Kopf	-	-	-	62,50
	Rohr / Kern	-	-	-	37,60



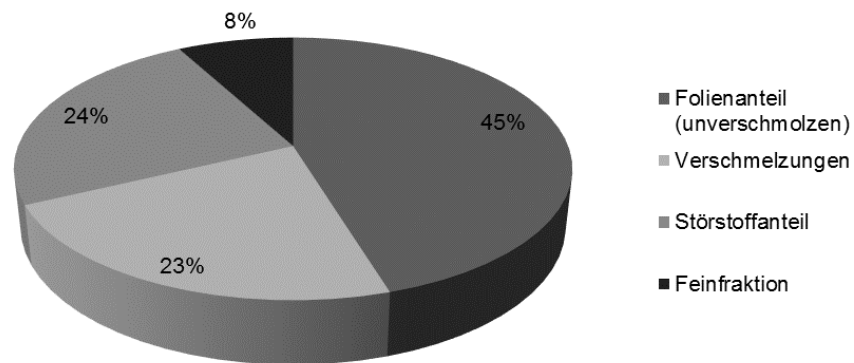
Anhang O: Folienballen-Bohrkernanalyse I

Grundlage: jeweils 6 Bohrungen in einer Reihe

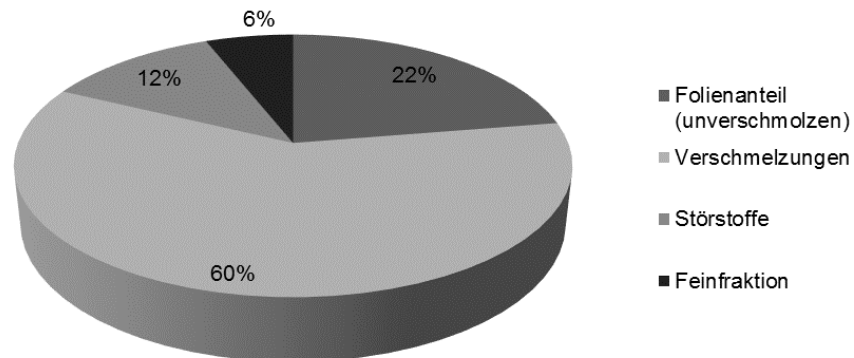
Zackenbohrkrone Folienballen



Fliesenbohrkronenbohrer Folienballen



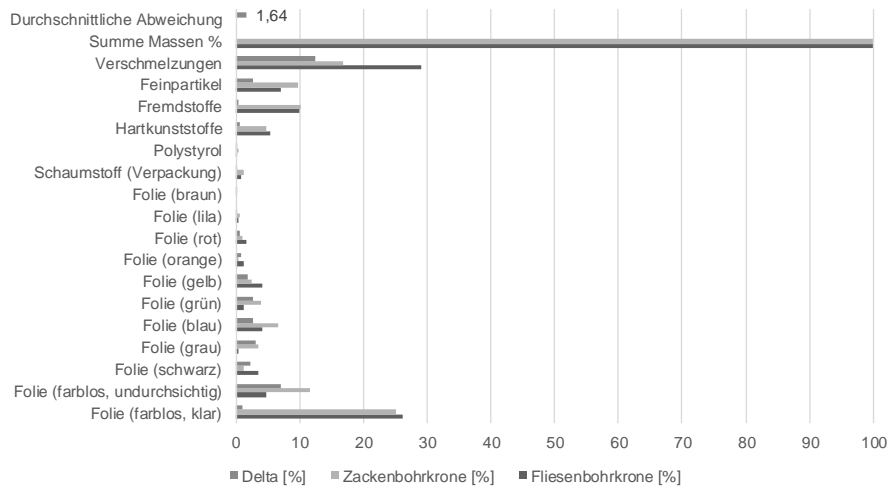
Betonbohrkrone Folie



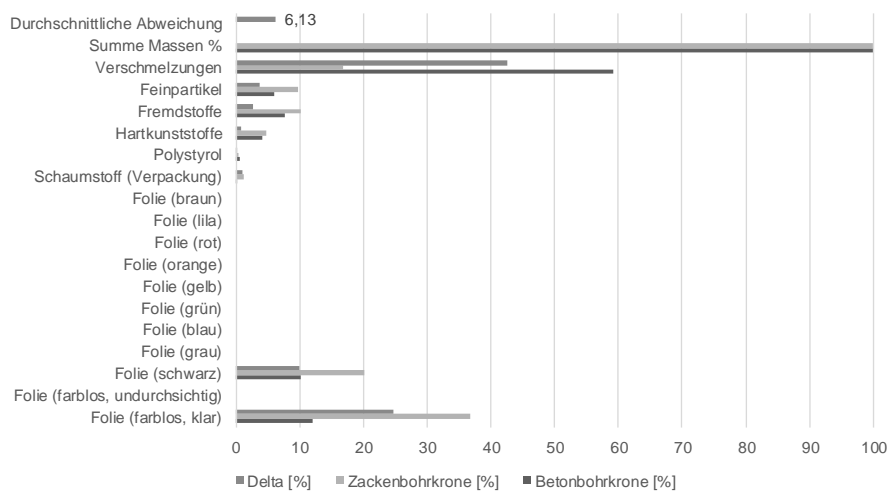
Anhang P: Folienballen-Bohrkernanalyse II

Grundlage: jeweils 6 Bohrungen in einer Reihe

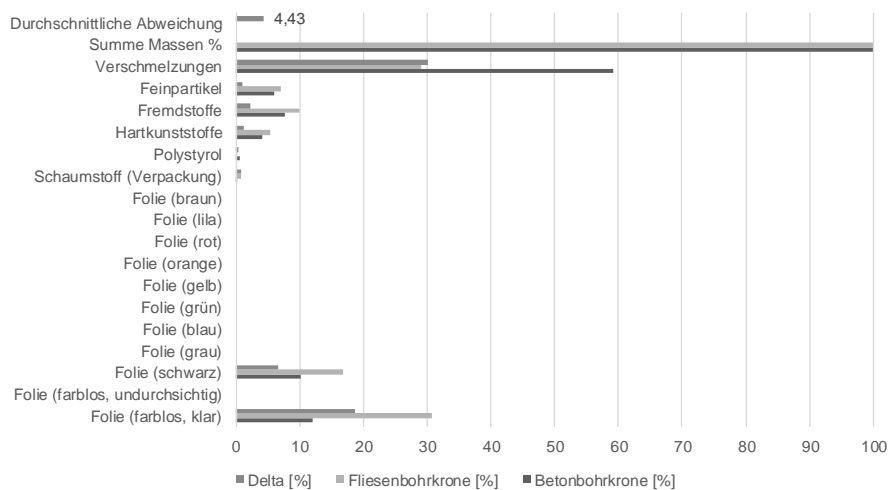
Vergleich Fliesenbohrkrone mit Zackenbohrkrone



Vergleich Betonbohrkrone mit Zackenbohrkrone



Vergleich Betonbohrkrone mit Zackenbohrkrone



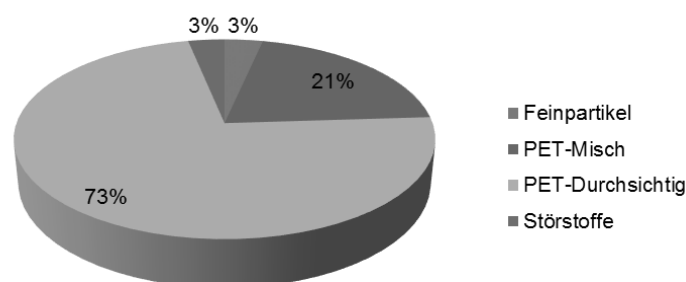
Anhang Q: PET-Ballen Bohrkernanalyse

Die Bohrversuche wurden von Herrn Andreas Glimm, B.Eng. im Rahmen seiner Bachelorthesis getätigt. Betreuer für die Bachelorthesis war Herr Christian Borowski, M.Eng. Siehe hierzu ebenfalls Anhang N, O, P. Der Ballen besitzt die Maße (BxHxT) 1100 mm x 1100 mm x 1200 mm und wiegt 416 kg. Resultierend daraus ergibt sich eine Dichte von $286,5 \text{ kg/m}^3$. Die Bohrlochtiefen liegen zwischen 250 mm und 300 mm. Wird eine Schüttdichte von 30 kg/m^3 für PET-Hohlkörper angenommen, ist der Ballen von der Presse 9,6-fach verdichtet worden. Dieser Wert entspricht den Daten aus Anhang A: Daten Ballendimensionen.

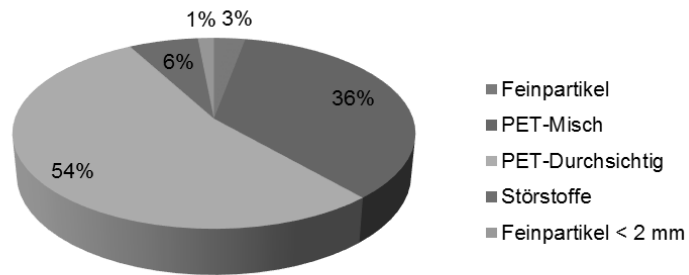


Anhang Q.1: Fliesenbohrkrone

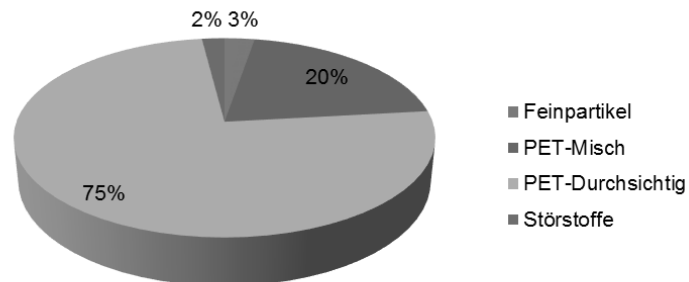
Bohrdurchgang I (Pressrichtung)



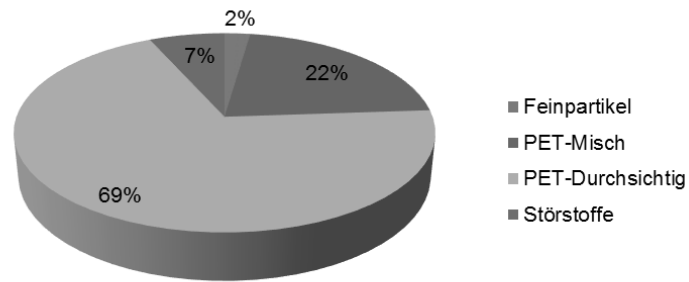
Fraktion	Gewicht [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	21,99	3,43
PET-Misch	132,02	20,58
PET-Durchsichtig	466,8	72,75
Störstoffe	20,84	3,25
Gesamt	641,65	100

Bohrdurchgang II (Pressrichtung)

Fraktion	Gewicht in [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	22,96	2,92
PET-Misch	280,04	35,59
PET-Durchsichtig	421,34	53,55
Störstoffe	50,68	6,44
Feinpartikel < 2 mm	11,81	1,50
Gesamt	786,83	100

Bohrdurchgang III

Fraktion	Gewicht [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	26,1	2,69
PET-Misch	198,92	20,53
PET-Durchsichtig	724,33	74,76
Störstoffe	19,54	2,02
Gesamt	968,89	100

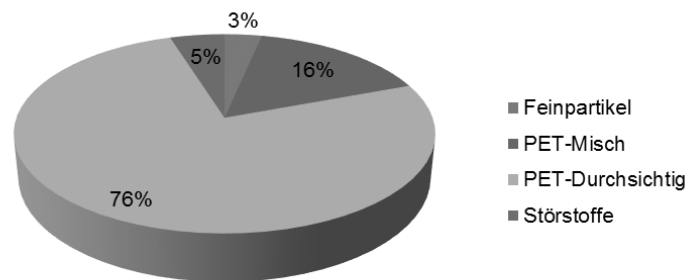
Bohrdurchgang IV

Fraktion	Gewicht in [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	11,54	2,30
PET-Misch	108,48	21,61
PET-Durchsichtig	347,97	69,33
Störstoffe	33,91	6,76
Gesamt	501,9	100

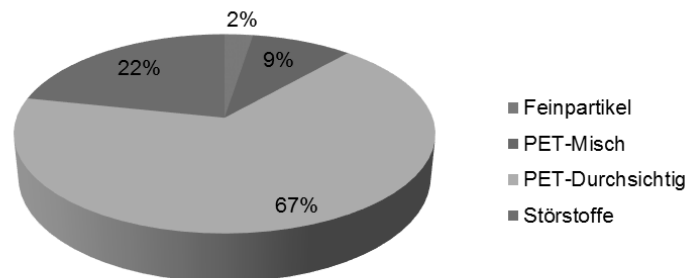
Masse und prozentuale Verteilung der Sortierfraktionen mit Fliesenbohrkrone

Bohrdurchgang	Masse [kg]	Feinpartikel [%]	PET-Misch [%]	PET-Durchsichtig [%]	Störstoffe [%]
Bohrdurchgang I	641,65	3,43	20,58	72,25	3,25
Bohrdurchgang II	786,83	4,42	35,59	53,55	6,44
Bohrdurchgang III	968,89	2,69	20,53	74,76	2,02
Bohrdurchgang IV	501,9	2,30	21,61	69,33	6,76
Durchschnitt	724,82	3,21	24,58	67,47	4,62

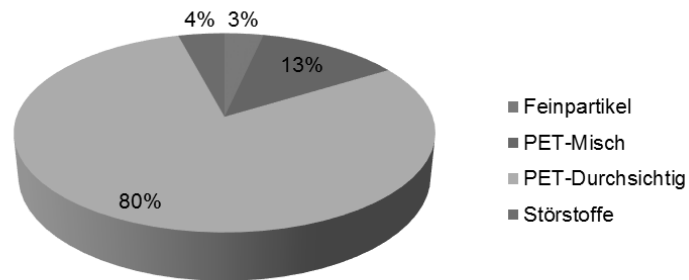
Anhang Q.2: Zackenbohrkrone

Bohrdurchgang V

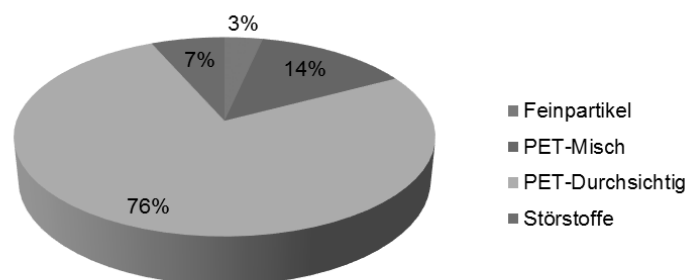
Fraktion	Gewicht [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	17,14	3,35
PET-Misch	81,94	15,99
PET-Durchsichtig	388,24	75,78
Störstoffe	25,01	4,88
Gesamt	512,33	100

Bohrdurchgang VI (Pressrichtung)

Fraktion	Gewicht [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	13,95	2,55
PET-Misch	49,32	9,01
PET-Durchsichtig	365,26	66,74
Störstoffe	118,72	21,69
Gesamt	547,25	100

Bohrdurchgang VII

Fraktion	Gewicht [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	31,39	3,49
PET-Misch	114,81	12,78
PET-Durchsichtig	715,15	79,59
Störstoffe	37,2	4,14
Gesamt	898,55	100

Bohrdurchgang VIII (Pressrichtung)

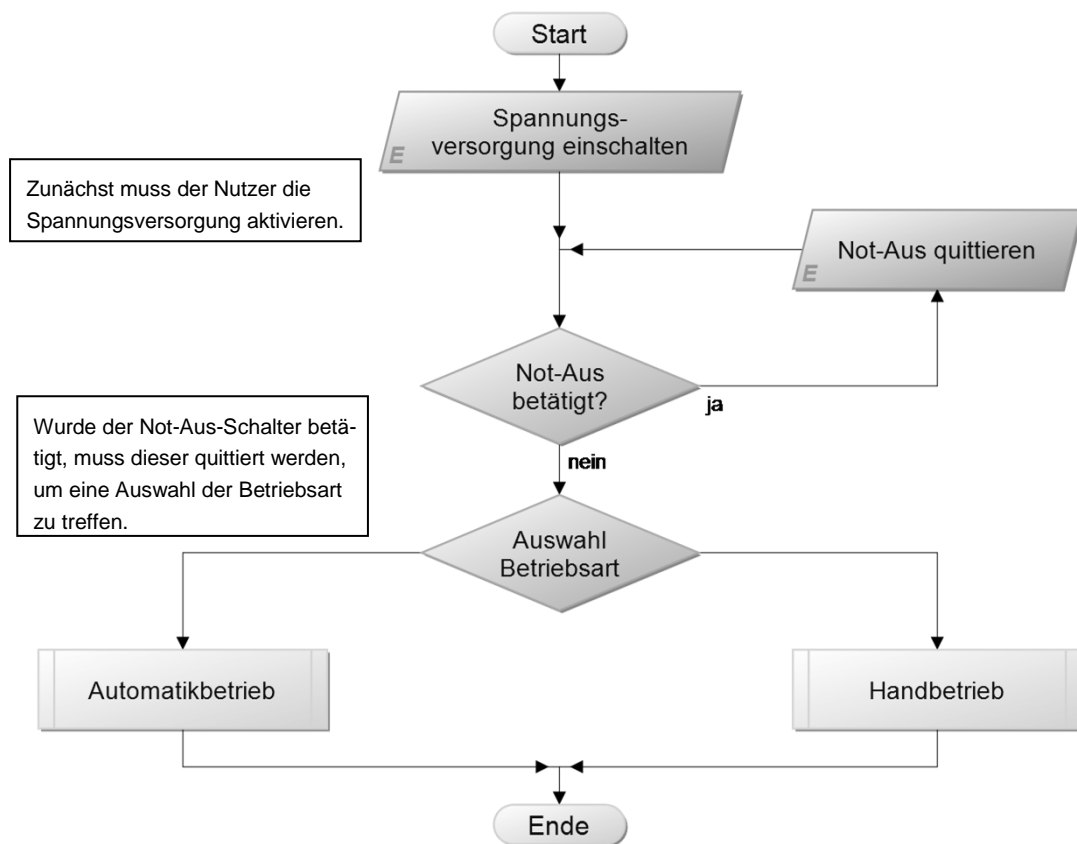
Fraktion	Gewicht in [g]	Anteil [%]
Feinpartikel	25,94	3,43
PET-Misch	104,41	13,83
PET-Durchsichtig	575,04	76,14
Störstoffe	49,81	6,60
Gesamt	755,2	100

Masse und prozentuale Verteilung der Sortierfraktionen mit Zackenbohrkrone

Bohrdurchgang	Masse [kg]	Feinpartikel [%]	PET-Misch [%]	PET-Durchsichtig [%]	Störstoffe [%]
Bohrdurchgang V	512,33	3,35	15,99	75,78	4,88
Bohrdurchgang VI	547,25	2,55	9,01	66,74	21,69
Bohrdurchgang VII	898,55	3,49	12,78	79,59	4,14
Bohrdurchgang VIII	755,20	3,43	13,83	76,14	6,60
Durchschnitt	678,33	3,21	12,90	74,56	9,33

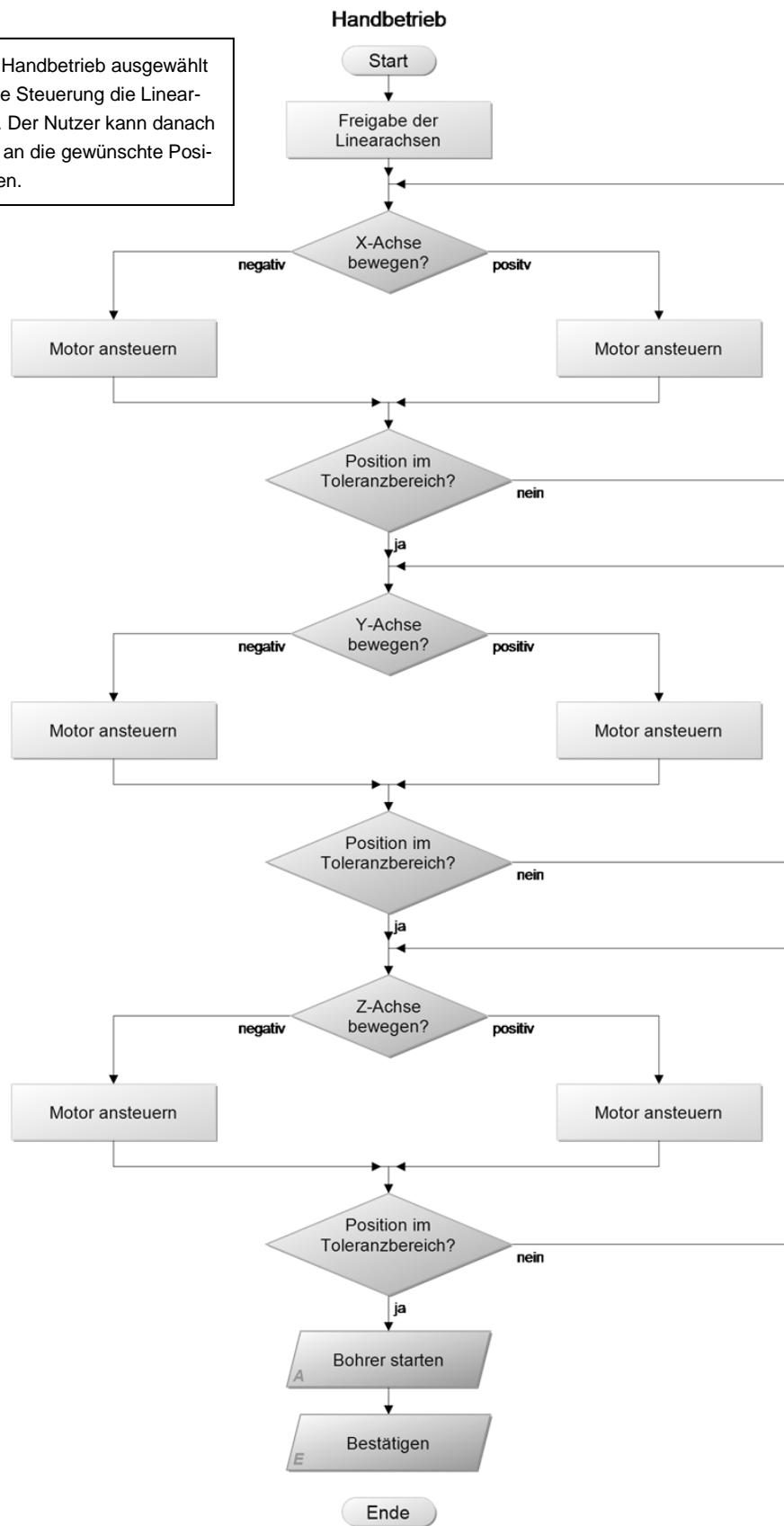
Anhang R: Programm für automatisierte Beprobung

Anhang R.1: Übersicht Ballenbeprobung

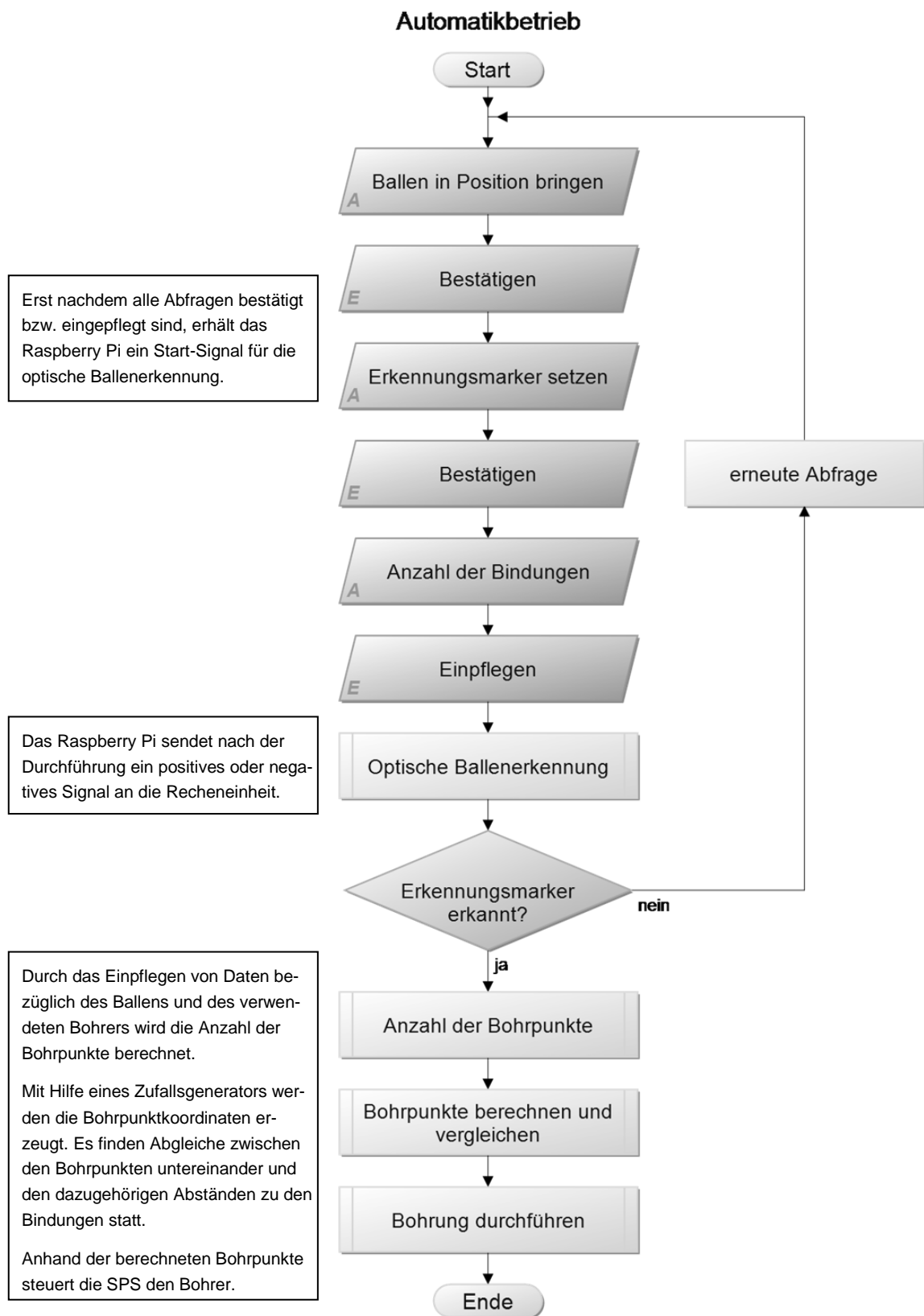


Anhang R.2: Übersicht Handbetrieb

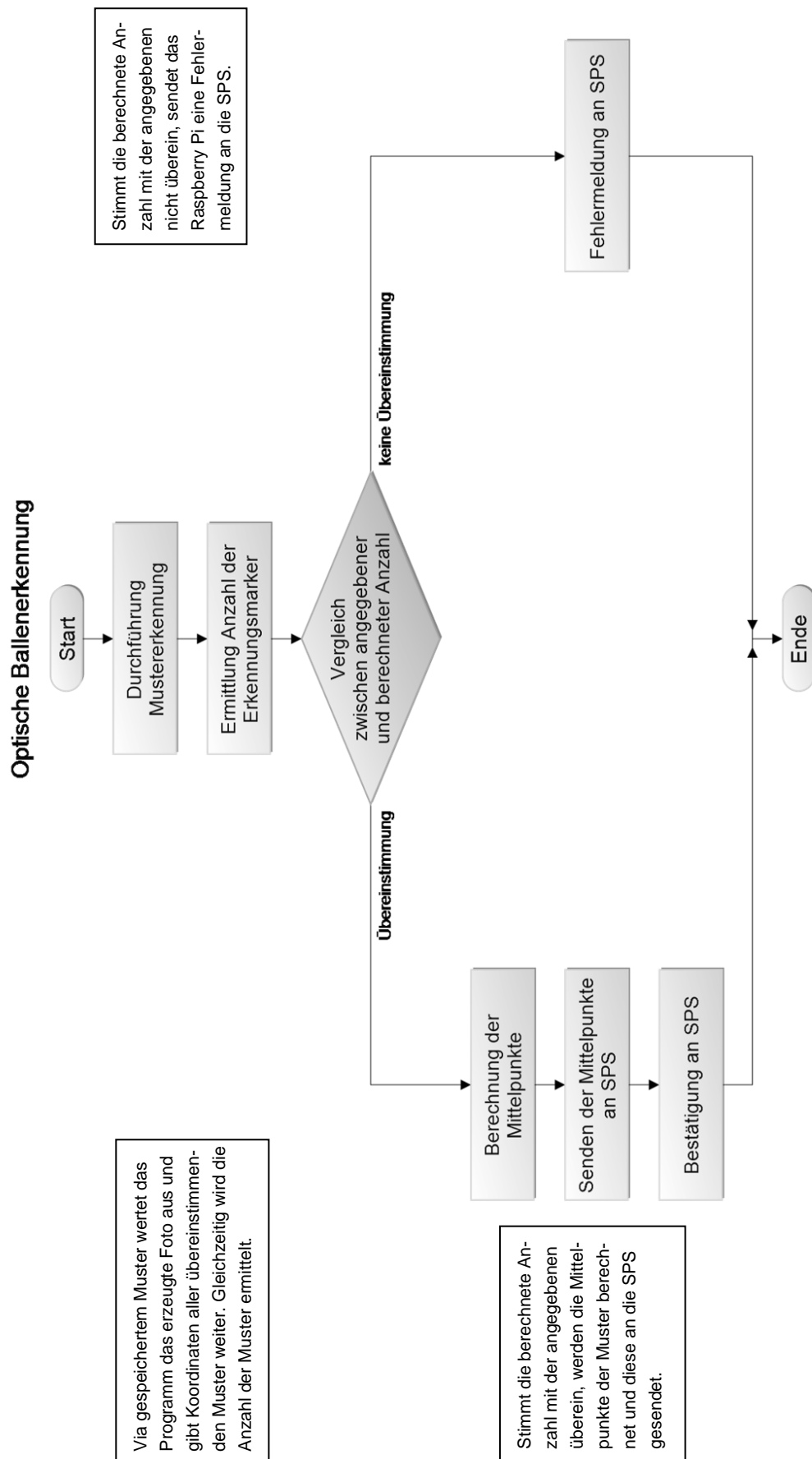
Sobald der Handbetrieb ausgewählt wird, gibt die Steuerung die Linearachsen frei. Der Nutzer kann danach den Bohrer an die gewünschte Position bewegen.



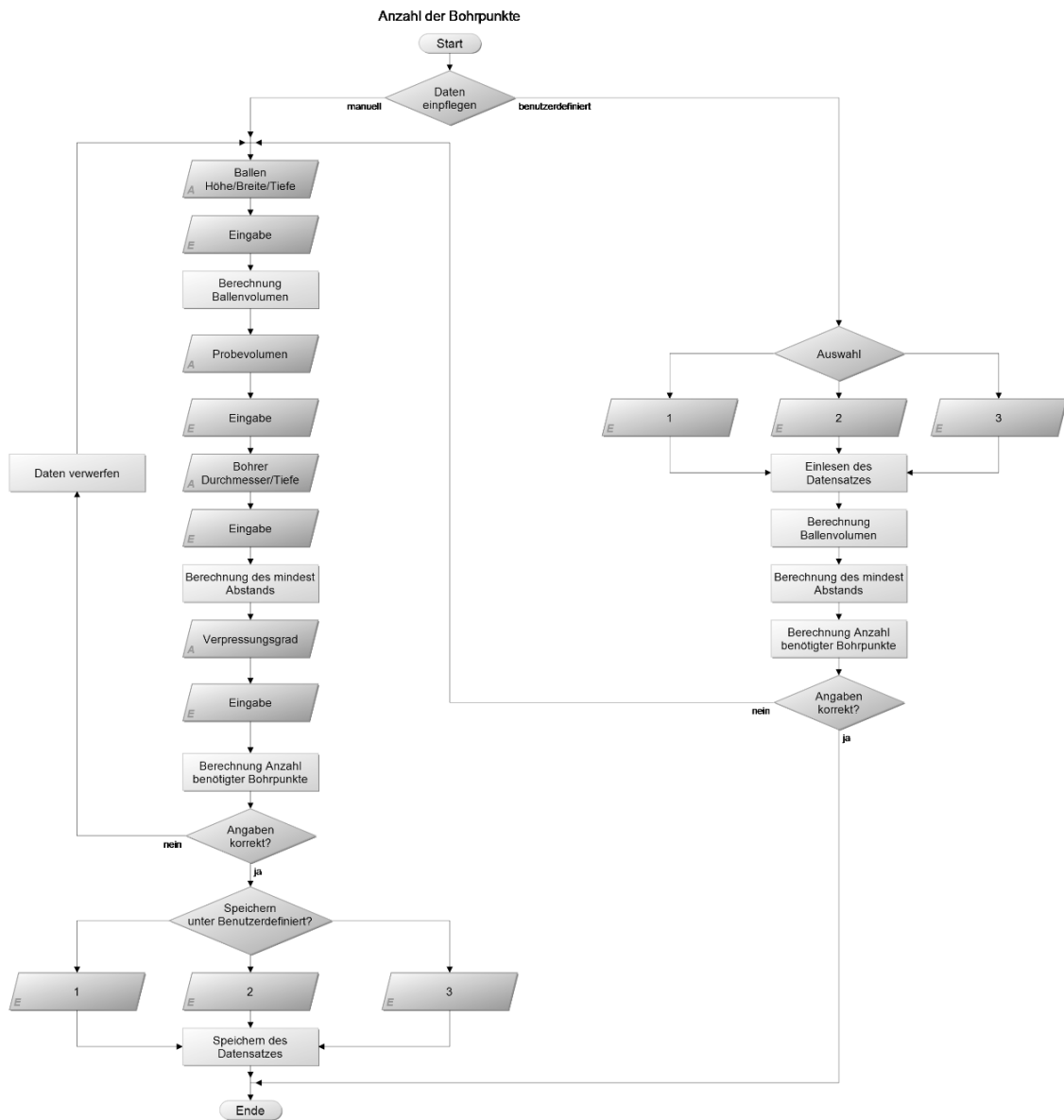
Anhang R.3: Übersicht Automatikbetrieb



Anhang R.4: Übersicht Optische Ballenerkennung

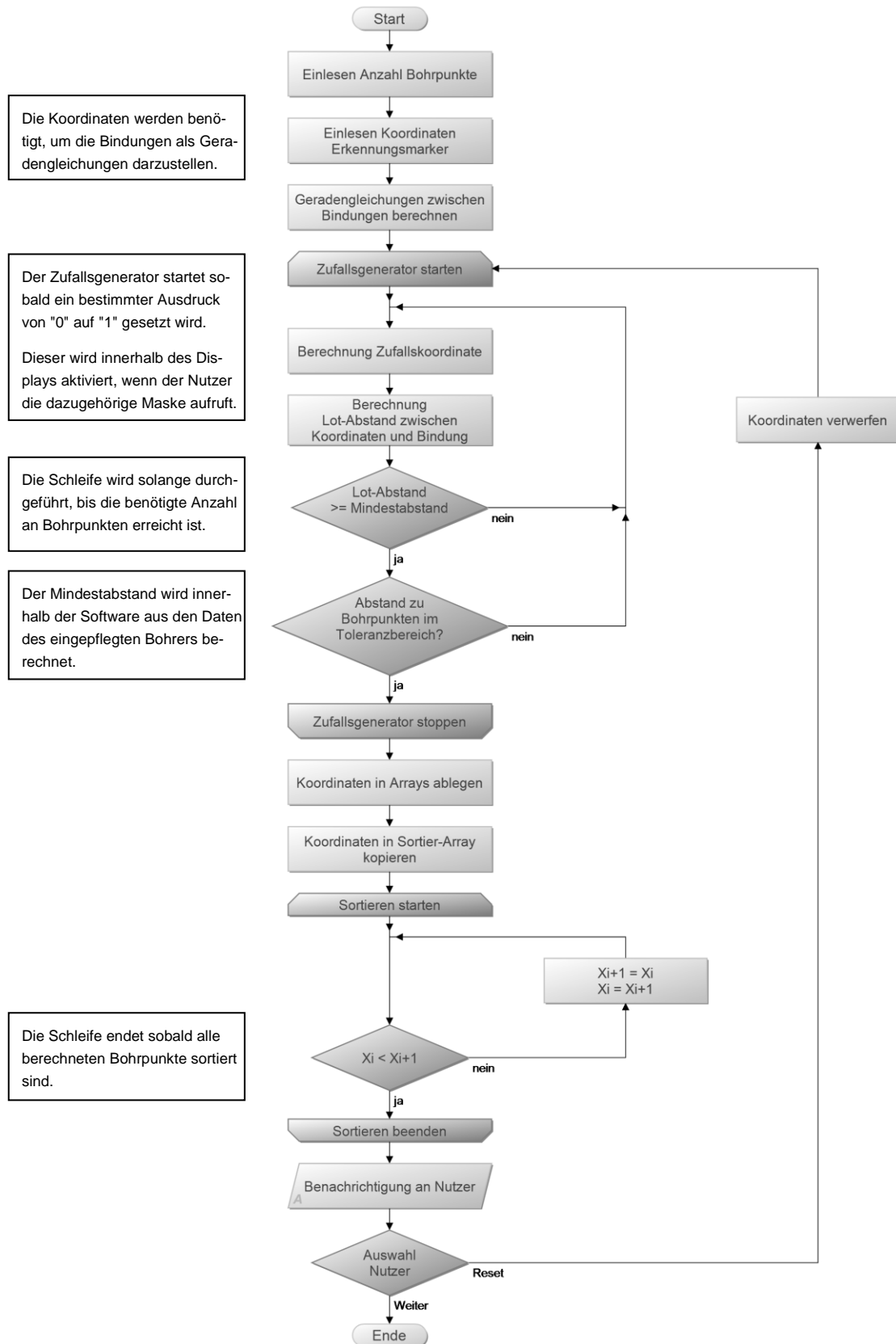


Anhang R.5: Übersicht Berechnung der Anzahl der Bohrungen

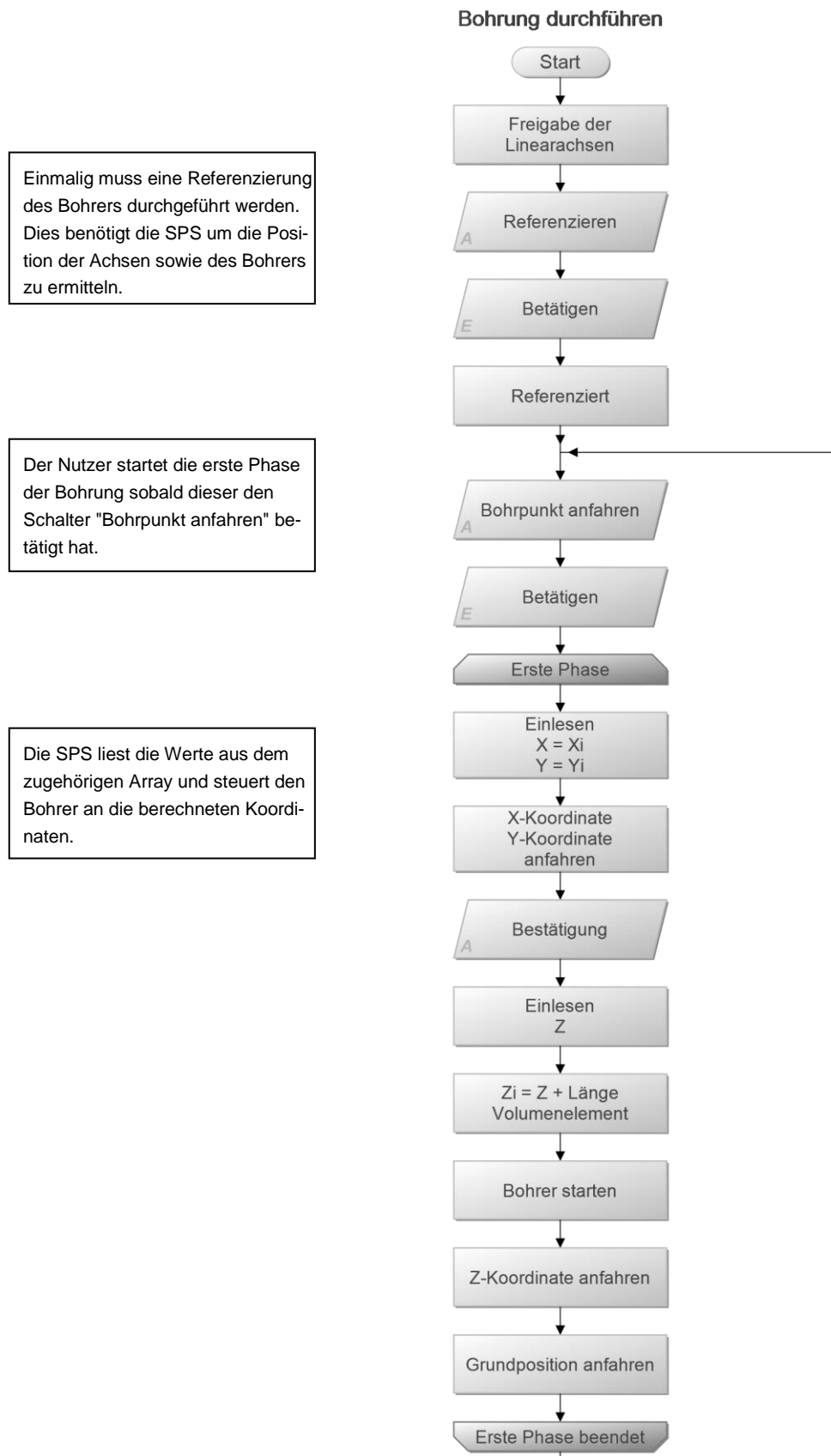


Anhang R.6: Übersicht Bohrpunkt-Koordinaten berechnen und vergleichen

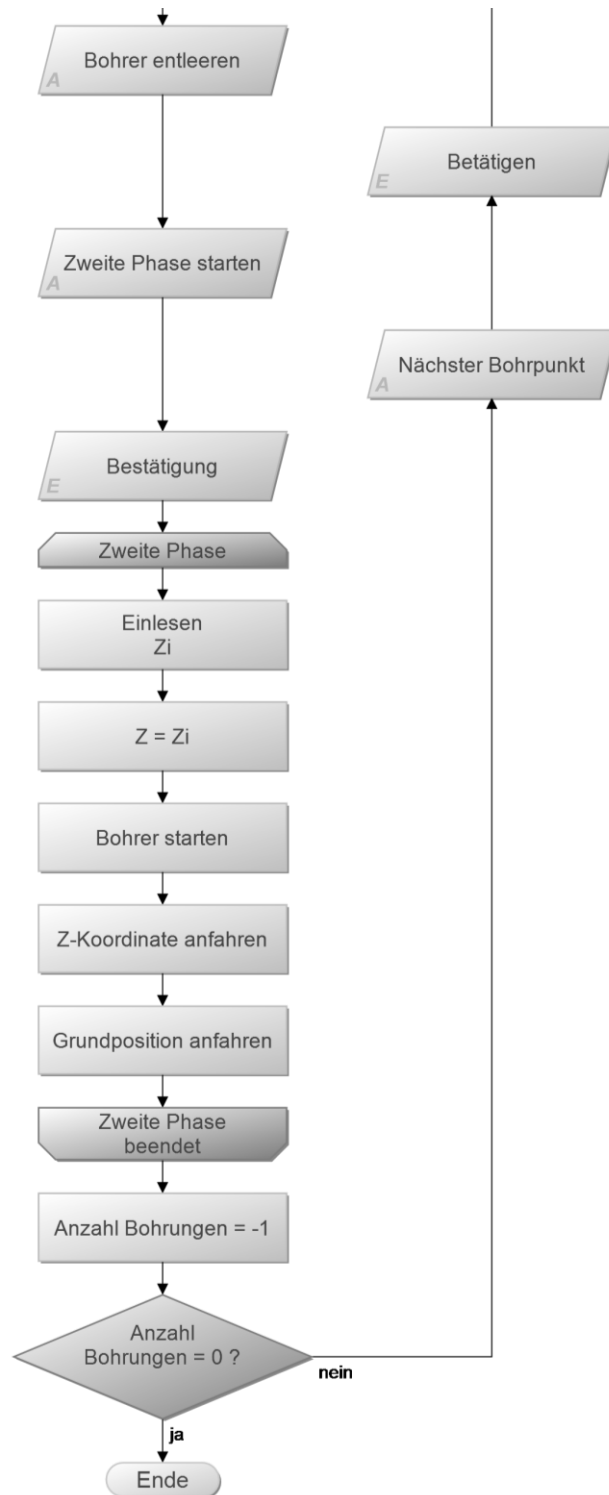
Bohrpunkte berechnen und vergleichen



Anhang R.7: Übersicht Bohrung durchführen



Nachdem die erste Phase durchgeführt wurde, muss der Nutzer den Bohrer entleeren und im nächsten Schritt die zweite Phase aktivieren.



Nachdem die zweite Phase beendet ist, verringert die SPS die verbleibende Anzahl der Bohrungen um "eins". Der Nutzer wählt den nächsten Bohrpunkt und startet das Verfahren erneut.

Anhang S: Visualisierung der automatisierten Beprobung

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

Welche Betriebsart soll gestartet werden?

Auto EIN Reset Hand AUS

weiter

Systembilder

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

☐ Richtige Position? ☒

☐ Erkennungsmarker gesetzt? ☒

☐ Anzahl der Bindungen: 1 x 1

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

☐ Richtige Position? ☒

☐ Erkennungsmarker gesetzt? ☒

☐ Anzahl der Bindungen: 1 x 1

Ein Fehler ist aufgetreten! Reset

Optische Erkennung erfolgreich! Weiter

Übersicht-Marker

Optische Ballenerkennung wurde gestartet

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

Zurück

Abstand: +5

	X	Y
A - B	+5	+5
B	+90	+10
C	+10	+95
D	+95	+90
E	+5	+50
F	+100	+55
G	+45	+5
H	+50	+95

Standard Null

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

Ballen-Angaben:

Höhe: 1,0 [m]

Breite: 1,0 [m]

Tiefe: 1,5 [m]

Volumen: 1500 [l]

Volumen: 1,5 [m³]

Beprobung: 10 [l]

Beprobung: 0,01 [m³]

Standard Null Lesen

1 2 3 1 2 3

Weiter Zurück

Bohrung-Angaben:

Durchmesser: 0,055 [m]

Radius: 0,027 [m]

Tiefe: 0,1 [m]

Volumen: 0,000237 [m³]

Anzahl: 42 [l]

Verpressungsgr.: 3 [l]

Anzahl incl. Vgr.: 14 [l]

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

Anzahl verbleibender Bohrungen: 7

Bohrpunkte: berechnen anzeigen

Weiter Zurück

Reset Bohrpunkte

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

zurück

Bohrpunkt:	X	Y	Z
1	14	16	32
2	14	42	31
3	16	26	34
4	21	85	66
5	27	78	39
6	28	61	68
7	29	27	69
8	33	34	16
9	34	20	13
10	38	61	55
11	39	67	38
12	64	82	54

Bohrpunkt:	X	Y	Z
13	83	52	42
14	87	35	66
15	00	00	00
16	00	00	00
17	00	00	00
18	00	00	00
19	00	00	00
20	00	00	00
21	00	00	00
22	00	00	00
23	00	00	00
24	00	00	00

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

HOME: OFF

Punkte anfahren: OFF

Bohren: OFF

aktueller Bohrpunkt:

X: +15 Y: +62 Z: +75

nächster Bohrpunkt

Anzahl verbleibender Bohrungen: 5

Reset

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

Zurück

Hoch: OFF

Runter: OFF

Weiter

Position: +000000

HOCHSCHULE NORDHAUSEN
University of Applied Sciences

10:59:39

Zurück

Links: OFF

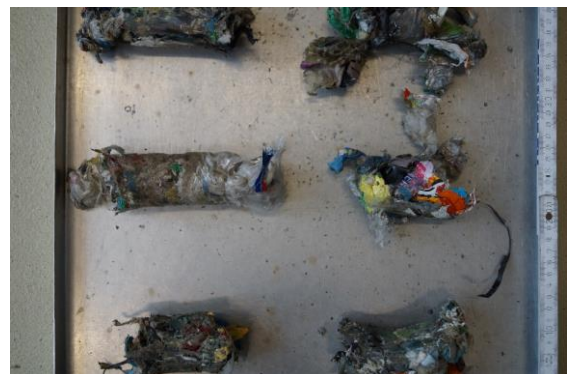
Rechts: OFF

Weiter

Position: +000000

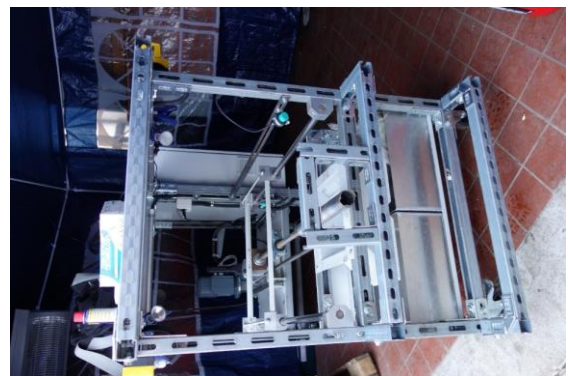
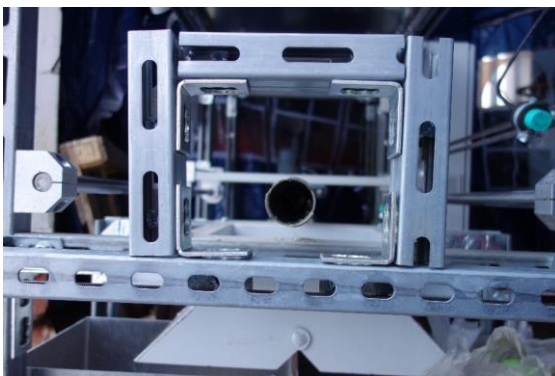
Anhang T: Bildersammlung Ballenbeprobung

Anhang T.1: Volumenelemente und Patties





Anhang T.2: Fehlschläge bei Bohrungen und Lösungen





Anhang U: Versuchsprogramm Ballenbeprobung – Grüner Punkt und HSN

Anhang U.1: Versuchsauswertung

Für die Versuche wurden zwei Ballen der Firma Tönsmeier Entsorgungsdienste GmbH (Oppin) mit der Dispo-Nr. 1000315093 verwendet. Das Durchschnittsgewicht eines Ballens, auf Grundlage des Dispo-Scheins, lag bei 600 kg. Messungen mit der Hubwagenwaage ergaben, dass beide Ballen rund 800 kg wogen. Die Ballen entsprachen der Fraktions-Nr. 350 – Mischkunststoffe. Als Gutanteile sind PP, PE, Folie, PS, EPS, PET sonstige, PET transparente Flaschen, sonstige Kunststoffe und als Störstoffe sind PPK, FKN, Metall, PVC, Rest angegeben. Hierbei werden die Folien sowie formstabiles PE/PP heraussortiert und die Netze zu den sonstigen Kunststoffen gezählt.

Gebohrt wurde mit einem Zackenkernbohrer ($d = 100 \text{ mm}$; $l = 600 \text{ mm}$) und einem Betonkernbohrer ($d = 62 \text{ mm}$; $l = 400 \text{ mm}$), vgl. Abb. 52.



Abb. 52: Verwendete Bohrkernbohrer.

Links: Maschine; Mitte: Zackenkernbohrer; Rechts: Betonkernbohrer.

Die Proben aus dem Zackenkernbohrer konnten gut sortiert werden, auch wenn diese infolge der Drehbewegung beim Bohren stellenweise ineinander verdreht waren. Bei dem Betonkernbohrer lagen Verschmelzungen vor, die mit einem verhältnismäßig großen Aufwand händisch gelöst werden mussten. Insgesamt waren die Proben sehr gut handelbar und mit einem überschaubaren Zeitaufwand zu entnehmen. Je Ballen wurde eine Seite mit einem großen Probenumfang untersucht (18/15) und von der gegenüberliegenden Seite jeweils drei Stichproben zur Gegenüberstellung entnommen.

Anhang U.2: Versuchsschema Ballen I

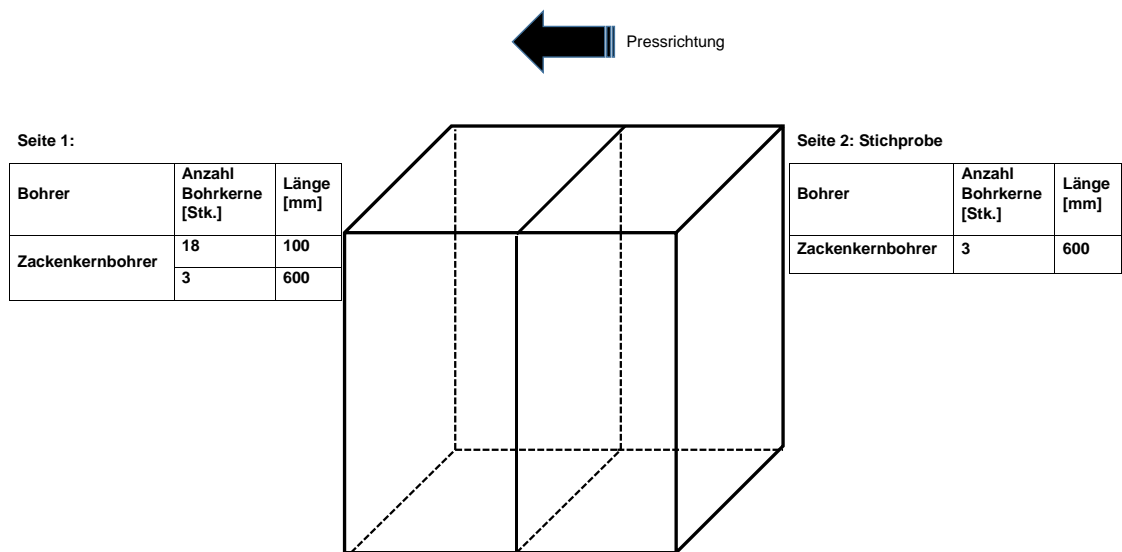


Abb. 53: Versuchsschema Ballen I.

Durchmesser Bohrer:	100 mm
Anzahl Bohrelemente:	18
Länge Bohrelement:	100 mm
Probengewicht:	5,12 kg

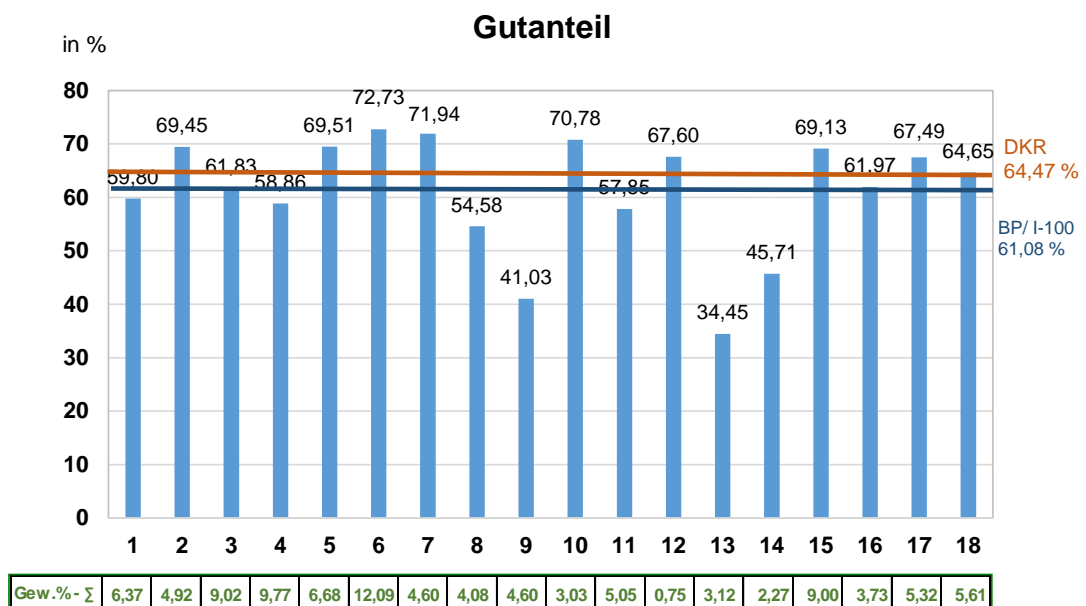


Abb. 54: Auswertung Ballen I / Seite 1 / 18 Proben à 100 mm.

Durchmesser Bohrer: 100 mm
Anzahl Bohrelemente: 3
Länge Bohrelement: 600 mm
Probengewicht: 4,37 kg

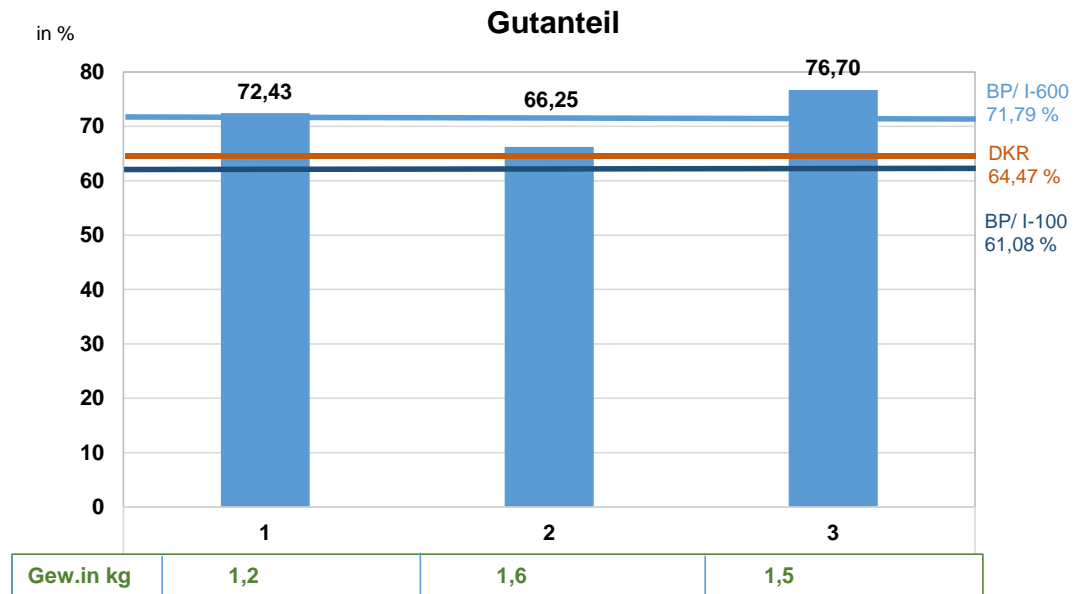


Abb. 55: Auswertung Ballen I / Seite 1 / 3 Proben à 600 mm.

Anhang U.3: Versuchsschema Ballen II

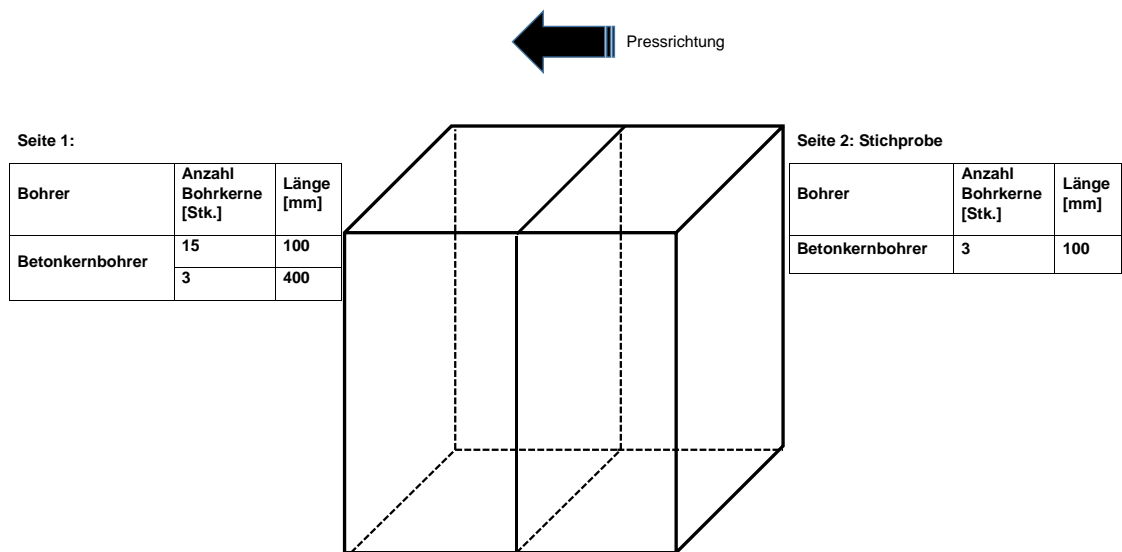


Abb. 56: Versuchsschema Ballen II.

Durchmesser Bohrer:	62 mm
Anzahl Bohrelemente:	15
Länge Bohrelement:	100 mm
Probengewicht:	1,82 kg

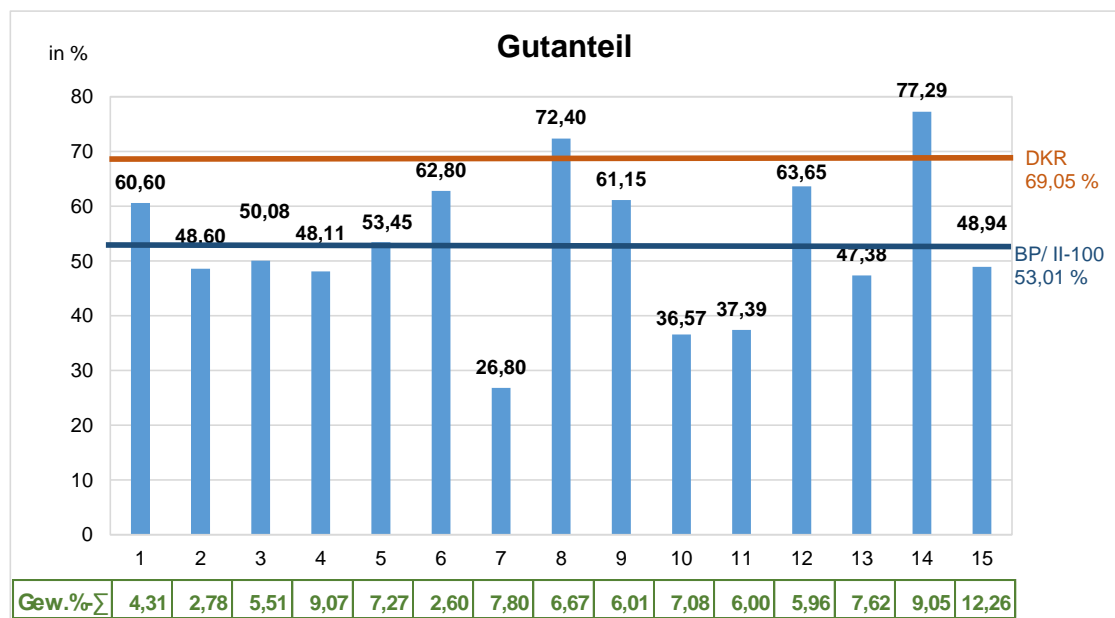


Abb. 57: Auswertung Ballen II / Seite 1 / 15 Proben à 100 mm.

Durchmesser Bohrer: 100 mm
Anzahl Bohrelemente: 3
Länge Bohrelement: 400 mm
Probengewicht: 526 g

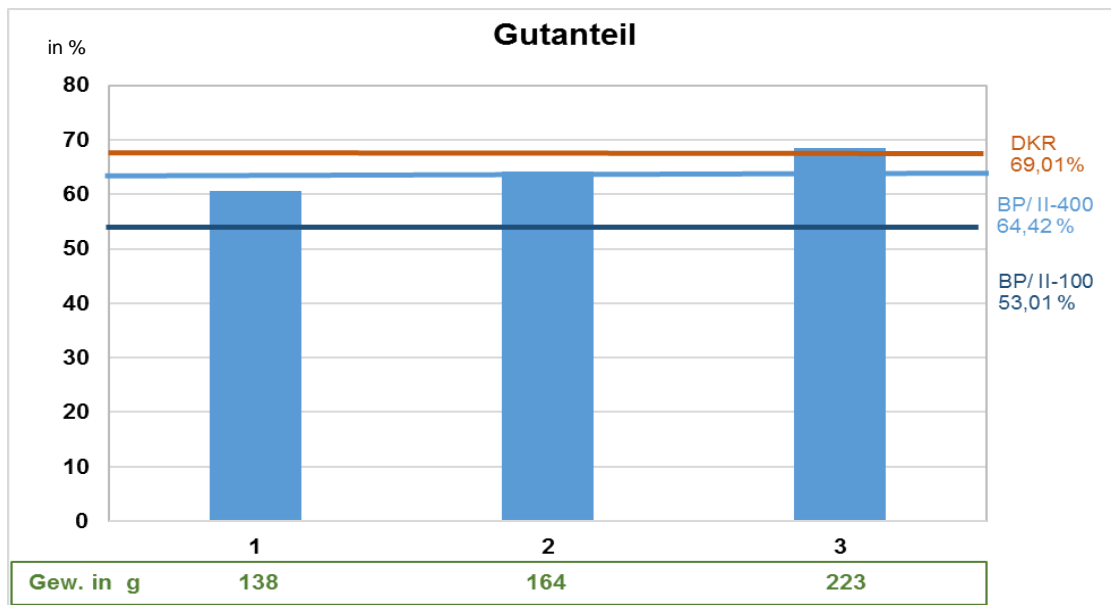
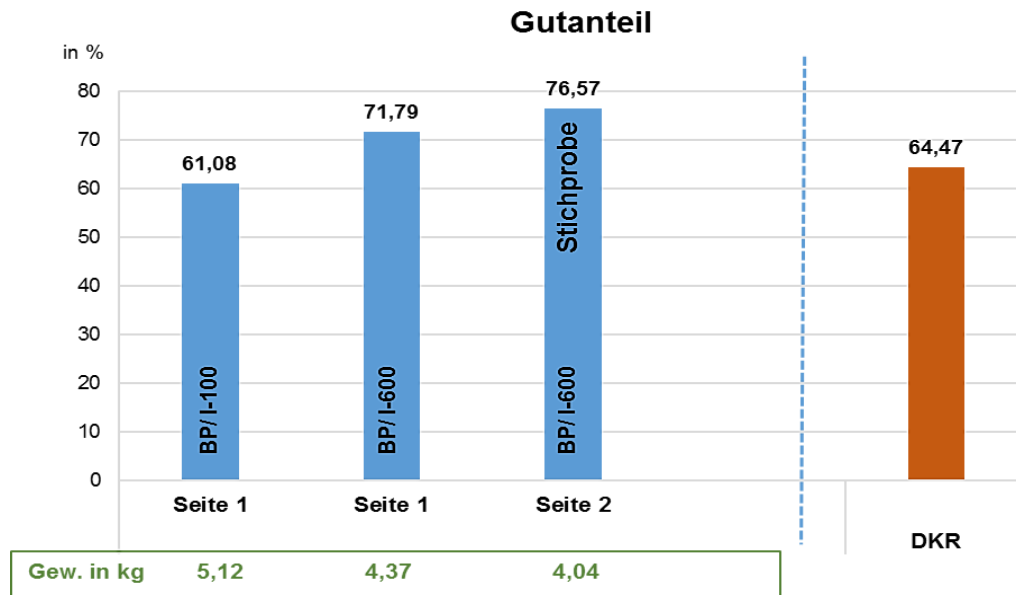
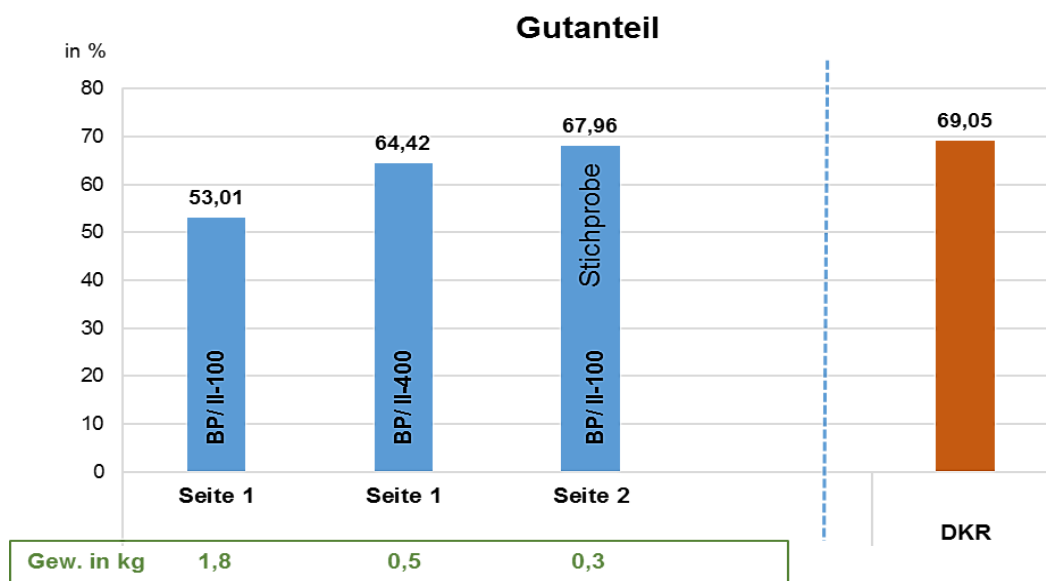


Abb. 58: Auswertung Ballen II / Seite 1 / 3 Proben à 400 mm.

Anhang U.4: Gesamtauswertung Ballen I und Ballen II inkl. Stichproben

Ballen I**Ballen II****Abb. 59:** Gesamtauswertung Ballen I und II inkl. Stichproben.

Anhang U.6: Tabellen zu den Auswertungen

Tab. 6: Daten Ballen I / Seite 1 / 18 Proben à 100 mm.

Probennummer	Gutanteil in g	Gew. Anteil in % - Σ ges.	Gutanteil in %
1	332,34	6,37	59,80
2	220,93	4,92	69,45
3	455,52	9,02	61,83
4	517,90	9,77	58,86
5	299,88	6,68	69,51
6	518,79	12,09	72,73
7	199,79	4,60	71,94
8	233,43	4,08	54,58
9	349,58	4,60	41,03
10	133,57	3,03	70,78
11	272,51	5,05	57,85
12	34,78	0,75	67,60
13	282,71	3,12	34,45
14	154,90	2,27	45,71
15	406,31	9,00	69,13
16	187,63	3,73	61,97
17	246,24	5,32	67,49
18	271,07	5,61	64,65
Ø BP/ I-100	5117,88		61,08

Tab. 7: Daten Ballen I / Seite 1 / 3 Proben à 600 mm.

BP/I-600							
Probe 1		Probe 2		Probe 3		Gesamt	
in kg	in %	in kg	in %	in kg	in %	in kg	in %
1,215	72,43	1,615	66,25	1,545	76,70	4,375	71,79

Tab. 8: Daten Ballen II / Seite 1 / 15 Proben à 100 mm.

Probennummer	Gutanteil in g	Gew. Anteil in % - Σ ges.	Gutanteil in %
1	78,4	4,31	60,60
2	50,58	2,78	48,60
3	100,16	5,51	50,08
4	164,87	9,07	48,11
5	132,2	7,27	53,45
6	47,29	2,60	62,80
7	141,69	7,80	26,80
8	121,29	6,67	72,40
9	109,15	6,01	61,15
10	128,74	7,08	36,57
11	109,01	6,00	37,39
12	108,4	5,96	63,65
13	138,42	7,62	47,38
14	164,41	9,05	77,29
15	222,73	12,26	48,94
Ø BP/ II-100	1817,34		53,01

Tab. 9: Daten Ballen II / Seite 1 / 3 Proben à 400 mm.

BP/ II-400 Ø							
1		2		3		Gesamt Ø	
in g	in %	in g	in %	in g	in %	in g	in %
138,42	60,56	164,41	64,26	222,73	68,43	525,56	64,42

Tab. 10: Daten Gesamtauswertung Ballen I und II inkl. Stichproben.

Ballen I							
BP/ I-100		BP/ I-600		BP/ I-600		DKR	
Seite 1		Seite 1		Seite 2			
100 mm		600 mm		600 mm			
in kg	in %	in kg	in %	in kg	in %	in kg	in %
5,12	61,08	4,37	71,79	4,04	76,57	80,50	64,47
					Stichprobe		

Ballen II							
BP/ II-100		BP/ II-400		BP/ II-400		DKR	
Seite 1		Seite 1		Seite 2			
100 mm		400 mm		400 mm			
in kg	in %	in kg	in %	in kg	in %	in kg	in %
1,82	53,01	0,526	64,42	0,276	67,96	80,95	69,05
					Stichprobe		

Anhang V: Daten DVD

Die Daten-DVD liegt dem Autor vor und kann auf Nachfrage und ggf. nötiger Absprache mit Dritten zugesendet werden.

Programmname	Pfad	Format
Dissertation_Borowski	A_Dissertation_Borowski	.docx
Dissertation_Borowski	A_Dissertation_Borowski	.pdf
Anhang_A_Daten_Ballendimensionen	B_Excel_Arbeitsblätter	.xlsx
Anhang_D_Ausgewählte_Kanalballenpressen	B_Excel_Arbeitsblätter	.xlsx
Anhang_F_Berechnungen_BP-ZG	B_Excel_Arbeitsblätter	.xlsx
Anhang_G_Berechnungen_BP-PN98_ZG	B_Excel_Arbeitsblätter	.xlsx
Anhang_H_Berechnungen_BP-Integral_ZG	B_Excel_Arbeitsblätter	.xlsx
Anhang_I_Berechnungen_BP-Sortier-ZG	B_Excel_Arbeitsblätter	.xlsx
A4_Produktspezifikationen	Anhang_C_Produktspezifikationen_Grüner_Punkt	.pdf
A7_Qualitätsprüfungsschema_Anlage7	Anhang_C_Produktspezifikationen_Grüner_Punkt	.pdf
Beiblatt2016	Anhang_C_Produktspezifikationen_Grüner_Punkt	.pdf
Sammlung_Produktspezifikationen_(diverse)	Anhang_C_Produktspezifikationen_Grüner_Punkt	.pdf
DIN_19698-2_Integrale Charakterisierung	D_Normen_und_Richtlinien	.pdf
DIN_54385_Pressbohrmethode	D_Normen_und_Richtlinien	.pdf
DIN_ISO_18414_Annahmeprobeverfahren	D_Normen_und_Richtlinien	.pdf
M32_LAGA_PN98	D_Normen_und_Richtlinien	.pdf
Saechsische_Sortierrichtlinie_2014	D_Normen_und_Richtlinien	.pdf
24_KuRiS_Dresden_Qualitätssicherung	E_Vorträge_Borowski	.pptx
8_SWS_Repräsentative_Probengewinnung	E_Vorträge_Borowski	.pptx
DGAW_Aachen_Ballenbeprobung_Poster	E_Vorträge_Borowski	.pdf
DGAW_Aachen_Posterpräsentation_Ballenbeprobung	E_Vorträge_Borowski	.pptx
DGAW_Berlin_Ballenbeprobung_Stipendium	E_Vorträge_Borowski	.pptx
DGAW_Berlin_Zufällige_Volumenelemententnahmen	E_Vorträge_Borowski	.pdf
Dr_Seminar_16_Zufällige_Volumenelemententnahmen	E_Vorträge_Borowski	.pdf
Dr_Seminar_17_Ballenbeprobung	E_Vorträge_Borowski	.pdf
UVR_FIA_Freiberg_Poster_DIN	E_Vorträge_Borowski	.pdf
PBM_PM_Ballen_Final		
Vorstellung_Promotion_HSN	E_Vorträge_Borowski	.pdf

A_Versuch_Wiesa_DSD	F_Bilddokumentation	.jpg
B_Graz_Ballen	F_Bilddokumentation	.jpg
C_Prüfung_nach_Grüner_Punkt	F_Bilddokumentation	.jpg
D_Fliesen_Zackenbohrer	F_Bilddokumentation	.jpg
E_Bohrkernanalyse_Folienballen	F_Bilddokumentation	.jpg
F_Bilder_Bohrkernanalyse_PET_Ballen	F_Bilddokumentation	.jpg
G_Auswahl_Videos_Ballenbeprobung_Misch- kunststoff	F_Bilddokumentation	.MTS

Quellenverzeichnis

Monographien:

Beel, Hendrik: Sortierung von schwarzen Kunststoffen nach ihrer Polymerklasse mit Hyperspectral-Imaging-Technologie. Erschienen in: Thomé-Kozmiensky / Daniel Goldmann (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe – Band 10, S. 175 – 190. Neuruppin: TK Verlag Thomé-Kozmiensky, 2017.

Bilitewski, Bernd / Härdtle, Georg: Abfallwirtschaft – Handbuch für Praxis und Lehre. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2013.

Danzer, Klaus / Hobert, Hartmut/Fischbacher, Christoph / Jagemann, Kay-Uwe: Chemometrik – Grundlagen und Anwendungen – Mit 206 Abbildungen. Berlin, Heidelberg, New-York: Springer Verlag, 2001.

Döring, Sebastian: Qualifizierung der Pressbohrmethode zur Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen. Dissertation. Clausthal: Technische Universität Clausthal, 2011.

Gy, Pierre: Sampling for Analytical Purposes. Cichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley & Sons, 1999.

Gy, Pierre: Sampling of Heterogeneous and Dynamic Material Systems: Theories of Heterogeneity, Sampling, and Homogenizing. Amsterdam: Elsevier, 1992.

Heinzler, Max / Kilgus, Roland / Näher, Friedrich / Paetzold, Heinz / Röhrer, Werner / Schilling, Karl / Stephan, Andreas: Tabellenbuch Metall. 41. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 1999.

Hellerich, Walter / Harsch, Guenther / Baur, Erwin: Werkstoffführer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte. 9. Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2004.

Martens, Hans / Goldmann, Daniel: Recyclingtechnik – Fachbuch für Lehre und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.

Pitard, Francis F.: Pierre Gy's Sampling theory and sampling practice: heterogeneity, sampling correctness and statistical purposes control. 2.nd edition. Boca Raton (Florida USA): CRC Press LLC, 1993.

Pitard, Francis F.: Pierre Gy's Sampling theory and sampling practice Volume II: Sampling correctness and sampling practice. Boca Raton (Florida USA): CRC Press LLC, 2000.

Rasemann, Winfried (Hrsg.): Handbuch Probenahme und Qualitätssicherung bei der Untersuchung und Bewertung von Stoffsystemen. Band 2. Freiberg: IQS Institut für Qualitätssicherung von Stoffsystemen Freiberg e. V., 2005.

Zwiele, Bertram: Entwicklung einer neuen Probenahmemethode für heterogene Abfälle geringer Schüttdichte. Dissertation. Berlin: Rhombos-Verlag, 2004.

Internetquellen:

Bibliographisches Institut GmbH – Dudenverlag (Hrsg.): Willkür, die. Dateiformat: html. Im Internet unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Willkuer>. Stand unbekannt. Abgerufen am 30.07.2017.

Bibliographisches Institut GmbH – Dudenverlag (Hrsg.): Zufallsgenerator, der. Dateiformat: html. Im Internet unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Zufallsgenerator>. Stand unbekannt. Abgerufen am 30.07.2017.

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (BVSE) (Hrsg.): GBP Quality GmbH gegründet: Im Namen der Qualität unterwegs. Im Internet unter: http://www.bvse-entsorgergemeinschaft.de/312/8526/GBP_Quality_GmbH_gegruetet__Im_Namen_der_Qualitaet_unterwegs_. Stand: 24.06.2016. Abgerufen am 20.12.2016.

Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (Hrsg.): Beiblatt 2016. Dateiformat: pdf. Im Internet unter: https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/layout/redaktion/Download/Der_Gruene_Punkt/Spezifikationen2016/deutsch/Beiblatt2016.pdf. Stand 31.07.2017. Abgerufen am: 31.07.2017.

Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (Hrsg.): Ein Vordenker der Kreislaufwirtschaft. Dateiformat: html. Im Internet unter: <https://www.gruener-punkt.de/de/unternehmen/der-gruene-punkt-dsd.html>. Stand 30.06.2017. Abgerufen am: 29.07.2017.

Der Grüne Punkt – Duales System Deutschland GmbH (Hrsg.): Qualitätsprüfungsschema – Anlage 7. Dateiformat: pdf. Im Internet unter: http://www.gruener-punkt.de/fileadmin/layout/redaktion/Download/Der_Gruene_Punkt/Spezifikationen2016/deutsch/A7_Qualitaetspruefungsschema__Anlage7_07_20160631.pdf. Stand 31.07.2017. Abgerufen am: 31.07.2017.

Durit Hartmetall GmbH (Hrsg.): Technologie und Wissen zum Thema Hartmetall. Im Internet unter: <http://m.durit.com/technologie/wissen/>. Stand 2017, Abgerufen am 11.04.2017.

GBP Quality GmbH (Hrsg.): Ablauf Sortieranalyse. Im Internet unter <http://www.gbp-quality.eu/ablauf-sortieranalyse/>. Stand: 19.12.2016. Abgerufen am: 20.12.2016.

GBP Quality GmbH (Hrsg.): Organisation. Im Internet unter: <http://www.gbp-quality.eu/referenzen/>. Stand: 19.12.2016. Abgerufen am: 20.12.2016.

GBP Quality GmbH (Hrsg.): Sortieranalysen – Aufgaben und Lösung. Im Internet unter: <http://www.gbp-quality.eu/ablauf-arbeitsweise-gbp-sortieranalysen/>. Stand: 19.12.2016. Abgerufen am: 20.12.2016.

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM) mbH: Entwicklung des Verpackungsaufkommens in Tausend Tonnen. Umweltbundesamt (Hrsg.). Im Internet unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/2_tab_entwicklung-verpackungsaufkommen_2016-09-21.png. Stand: 01.03.2016. Abgerufen am: 28.12.2016.

Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung (GVM) mbH: Verwertungsquoten der Dualen Systeme 2014. Umweltbundesamt (Hrsg.). Im Internet unter: http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/13_tab_verwertungsquoten-duale-systeme_2016-09-21.png. Stand: 01.03.2016. Abgerufen am: 28.12.2016.

KunststoffWeb GmbH (Hrsg.): K-Recycling: Italienische Initiativen Carpi und Corepla kooperieren. Im Internet unter: https://www.kunststoffweb.de/ki_ticker/K-Recycling_Italienische_Initiativen_Carpi_und_Corepla_kooperieren_t235554. Stand: 21.11.2016. Abgerufen am: 17.01.2017.

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (Hrsg.): Boden- und Futtermitteluntersuchung für Pferdehalter – Auftragsformular Pferdeweiden und Pferdefutter. Im Internet unter: <https://www.landwirtschaftskammer.de/lufa/auftragsformulare/boden/auftrag-pferde-futtermittel-boden.pdf>. Stand: 01.10.2015. Abgerufen am: 19.09.2016.

Macpresse Europa (Hrsg.): MAC 108/1. Im Internet unter: <http://lnx.macpresse.com/en/mac-108/>. Stand: unbekannt. Abgerufen am: 05.01.2017.

Umweltbundesamt (Hrsg.): Verpackungsabfälle. Im Internet unter: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/verpackungsabfaelle#textpart-1>. Stand: 21.09.2016. Abgerufen am: 28.12.2016.

Zeitschriften/Aufsätze in Zeitschriften und Skripte:

Agrarforschung Schweiz (Hrsg.): Nutztiere - Heu- oder Haylageproduktion von zwei Grasmischungen. Erschienen in: Agrarforschung Schweiz. Heft 6 (2) 2015, Seite 64-71. Posieux (CH): Agrarforschung Schweiz, 2015.

Technische Universität Darmstadt, Papierfabrikation u. Mechanische Verfahrenstechnik (PMV) / IfP-GmbH (Hrsg.): AiF-Abschlussbericht 15408 N – Qualitätseigenschaften der wichtigsten Altpapiersorten in Abhängigkeit von den Sortierbedingungen. Im Internet unter: http://www.pmv.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_pmv/bibliothek_1/aif_veroeffentlichungen/AiF15408.pdf. Stand: 18.11.2010. Hochgeladen am: 01.11.2013. Abgerufen am 22.09.2016.

Umweltbundesamt (Hrsg.): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nichtverpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung. Erschienen in: Texte 40/2012. Dessau-Roßlau, August 2012.

Wellacher, Martin / Aldrian, Alexia / Pomberger, Roland: Neue Methode zur Probenahme grobstückiger Abfälle aus Ballen. In: Verfahrenstechnik. Nietwerder: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016. Im Internet unter: http://www.vivis.de/phocadownload/2016_rur/2016_RuR_621-632_Wellacher_Aldrian.pdf. Abgerufen am 01.12.2016.

Vorträge:

Textor, Dirk (Hrsg.): Quote, Qualität, Produkt. Vortragsrahmen: 9. Nordhäuser Sekundärrohstoffworkshop, Hochschule Nordhausen, 2016.

Bachelor- und Master-Thesen:

Glimm, Andreas (Hrsg.): Entwicklung einer Maschine zur gezielten Volumenentnahme aus Wertstoffballen. Nordhausen: Hochschule Nordhausen, 2015.

Reutershahn, Jan (Hrsg.): Konzeption, Aufbau und Inbetriebnahme eines steuerungstechnischen Prüfstandes für die Ballenbeprobung. Nordhausen: Hochschule Nordhausen, 2016.

Gesetze und Verordnungen:

Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung - VerpackV): Herausgeber: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz – Bundesrepublik Deutschland. Ausfertigungsdatum: 21.08.1998. Zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 17.7.2014 I 106.

Normen/Richtlinien:

DIN Deutsches Institut für Normung e.V./Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): Untersuchung von Feststoffen – Probenahme von festen und stichfesten Materialien – Teil 2: Anleitung für die Entnahme von Proben zur integralen Charakterisierung von Haufwerken; Deutsche Fassung DIN 19698-2:2016-12.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V./Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): Feste Sekundärbrennstoffe – Gewinnung repräsentativer Analysenproben aus heterogenen Stoffen mit geringer Schüttdichte nach der Pressbohrmethode; Deutsche Fassung DIN 54385:2016-08.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V./Beuth Verlag GmbH (Hrsg.): Annahmeprobefahren anhand der Anzahl fehlerhafter Einheiten oder Fehler – Vertrauensbasiertes Probensystem mit der Annahmezahl Null zur Prüfung der Ausgangs-Qualitätslage DIN ISO 18414:2012-02.

Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA (Hrsg.): LAGA PN 98 - Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. Stand: Dezember 2001. Mainz: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz, 2004.

INTECUS GmbH: Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen – Sächsische Sortierrichtlinie 2014. Stand: 04.02.2015. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 2015.